

論文 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

應 江虹^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・浅野 雅則^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：弾性波伝播速度は、PC グラウト充填評価のための評価指標として、これまでに主に供試体および実構造物での実験によって、その有効性が確認されている。本研究では、さらにこの手法において弾性波伝播速度が変化する要因を詳細に明らかにするために、グラウト充填の有無ならびに構成部材の寸法および物性値の違いが弾性波伝播速度に与える影響に関して、3次元 FEM 解析を用いて検討した。その結果、グラウト充填の有無および対象部材の寸法あるいは物性値の違いによって弾性波伝播速度が変化するメカニズムや値の変動傾向が明らかとなった。

キーワード：非破壊検査，衝撃弾性波法，PC グラウト充填評価，FEM 解析，伝播速度

1. はじめに

ポストテンション方式の PC 構造物において、PC グラウトの充填不良は、PC 鋼材の腐食につながり、構造物の安全性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。PC グラウトの充填状況を非破壊的に評価する方法としては、既に、X 線法等の放射線による手法や衝撃弾性波法等の適用可能性が示されている。しかしながら、いずれの手法も、検出精度や適用範囲、適用限界等に関して、検討課題を有しており、実用的で有効な手法の確立が急務となっている。

そこで、筆者らは、主にスラブ供試体や実構造物での実験を通して、PC グラウトの充填評価における衝撃弾性波法の適用を検討してきた。その結果、グラウト充填程度の評価指標としては、弾性波伝播速度が有効であることを見出している^{1), 2)}。ただし、これまでの検討では、対象としたひとつの供試体や構造物内でのグラウト充填状況について、それぞれに相対的評価を行っている。しかしながら、本手法で計測される弾性波伝播速度は、対象物の構成材料の寸法

や物性の違いなどによって変化することも考えられる。したがって、条件の異なる種々の構造物への本手法の適用性を確認するためには、これらの因子が弾性波伝播速度の変化に与える影響を把握しておくことが重要である。

本研究では、これらの影響因子と弾性波伝播速度との関係を把握することを目的として、既往の実験²⁾をもとに、3次元 FEM 解析を行った。解析では、PC スラブ供試体をモデル化して構成材料の寸法および物性値を変化させ、その弾性波伝播挙動を把握するとともに、伝播速度に関する検討を加えた。

2. 解析概要

2.1 解析条件

解析には、汎用有限要素法解析プログラムを使用し、動的応答解析を行った。モデルは、既往の実験結果²⁾と比較するため、文献における PC スラブ供試体(PCタンク側壁を想定したものである)の寸法を踏まえて、図-1に示すように 2,000×250×6,000[mm]のコンクリートスラブ

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 学生 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 助教授 工博 (正会員)

*3 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 学生 工修 (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

の中央に、PC鋼棒、グラウト、シースおよび定着プレートを配置することにより作成した。なお、モデルではその対称性を考慮して、鋼棒断面の中心軸を対称軸とした1/4モデルを用いた。要素には8節点ソリッド要素を使用し、要素の代表長さを12.5mmとした。また、本解析に用いたすべての構成材料は弾性体として扱い、材料間の接合面は、節点を共有させて一体化した。モデルにおいては、図-2に示す波形によりPC鋼棒中心の節点に図-1に示す矢印の方向に衝撃荷重を与えた。荷重の継続時間および最大荷重は、それぞれ既往の研究^{3), 4)}を参考に決めたものである。

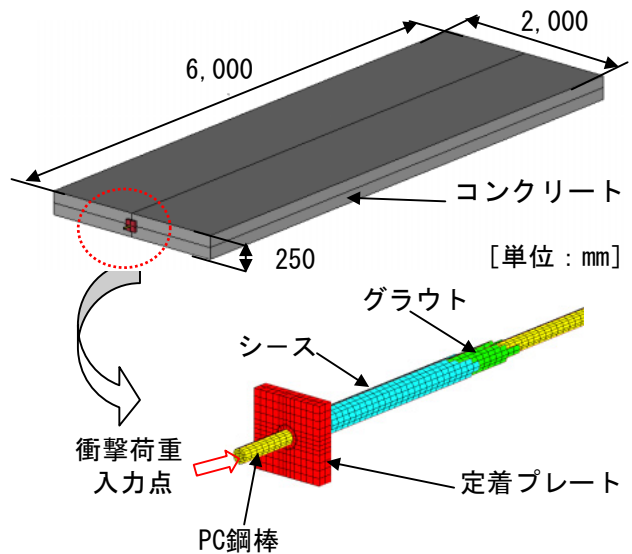


図-1 解析モデル

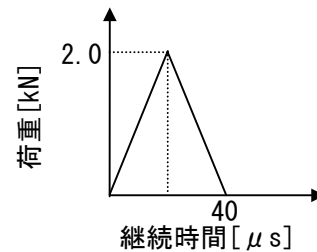


図-2 入力波形

出力結果より、入力とは反対側の定着プレート上の節点（鋼棒中心から35mm離れた点：実験における受振センサの貼付位置を想定）における変位の到達時間を、この節点と荷重入力節点との間の距離で除すことによって見かけ伝播速度を求めた（以後、伝播速度とする）。また、波形の検討のために、節点における弾性波伝播方向の加速度波形を算出した。なお、データの出力は、時間間隔10 μsとし、出力データ数を1024とした。

2.2 解析ケース

解析では、伝播速度の変化する要因分析を主眼としているため、すべてのパターンにおいて、グラウト未充填（シース内グラウト体積 0%）と充填（シース内グラウト体積 100%）の2種類とした。解析モデルは次の通りの5パターンを作成した。

1) 構成材料の寸法の影響に関する検討

構成材料の寸法が伝播速度に与える影響を検討するため、まず、PC鋼棒の直径を、表-1に示すような3パターンとしてモデル化した。

一方、スラブの厚さの違いが伝播速度に与える影響を検討するため、モデル1において、スラブの厚さのみを300, 350mmとした2パターンを加えた。なお、構成材料の物性値は、表-2に示すものを用いた。

表-1 材料寸法に関する検討ケース

モデルパターン	主な材料寸法 [mm]		
	PC鋼棒直径	シース内径	スラブ厚さ
モデル1	23	35	250
モデル2	26	43	
モデル3	32	43	
モデル4	23	35	300
モデル5			350

表-2 材料物性値

構成材料	密度 [g/cm ³]	ポアソン比	弾性係数 [GPa]
PC鋼棒	7.9	0.3	203
コンクリート	2.3	0.2	35
グラウト	1.7	0.15	23
シース	5.6	0.3	119
定着プレート	7.9	0.3	203

表-3 弾性係数の影響に関する検討ケース

構成材料	弾性係数 [GPa]		
(検討1) PC鋼棒	180	203	220
(検討2) コンクリート	35	40	45
(検討3) グラウト	18	23	28

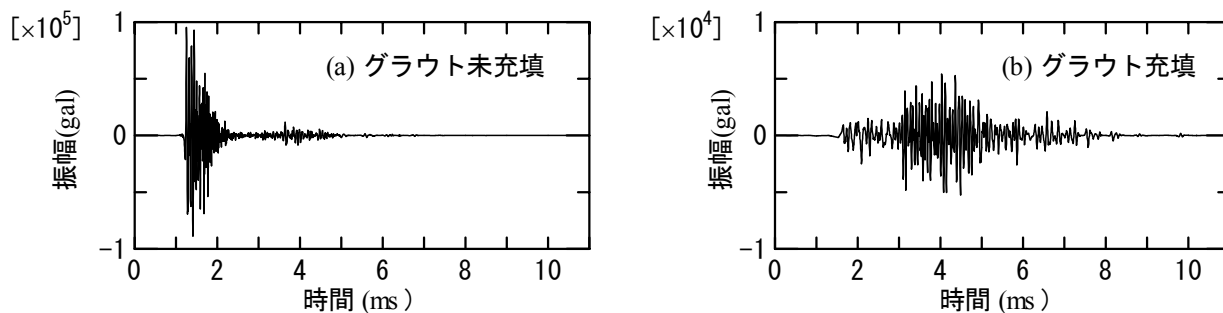


図-3 解析による加速度波形

2) 材料物性値の影響に関する検討

構成材料の物性値の影響に関する検討では、材料の弾性係数に着目し、モデル1(PC鋼棒直径23mm, コンクリート厚さ250mm)において、表-2に示すPC鋼棒、コンクリートおよびグラウトの弾性係数のみを表-3に示すものとして、解析を行い、それぞれの影響を検討した。

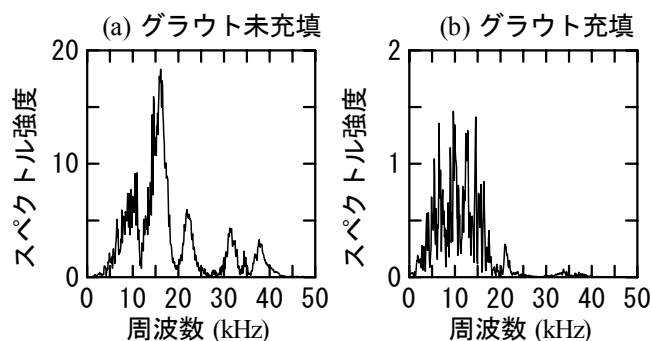


図-4 解析による加速度波形の周波分布

3. 解析結果及び考察

3.1 伝播特性に対する検討

図-3に、モデル1において得られた加速度波形を示す。図より、グラウト未充填の場合は、波形の立上がりが非常に鋭くなっているのに対して、グラウト充填では、波形が大きく変化し、最大振幅値もずいぶん小さくなっていることがわかる。

図-4に加速度波形の周波数分布を示す。これによれば、グラウト未充填の場合に比べ、グラウト充填では、スペクトル強度が小さく、グラウト未充填の場合にみられる20kHz以上の成分がほとんどみられず、周波数成分は全体的に低い側にシフトしていることがわかる。これらの解析結果は、既往の実験結果²⁾と同じ傾向を示している。

また、図-5に示した入力より120 μ s経過後のモデルにおける定着プレート近傍での変位分布において、入力された弾性波はモデル中に球面状に伝播していることが分かる。また、弾性波の波頭(矢印)に着目すると、グラウト未充填ではグラウト充填とは異なり、PC鋼棒上に他の

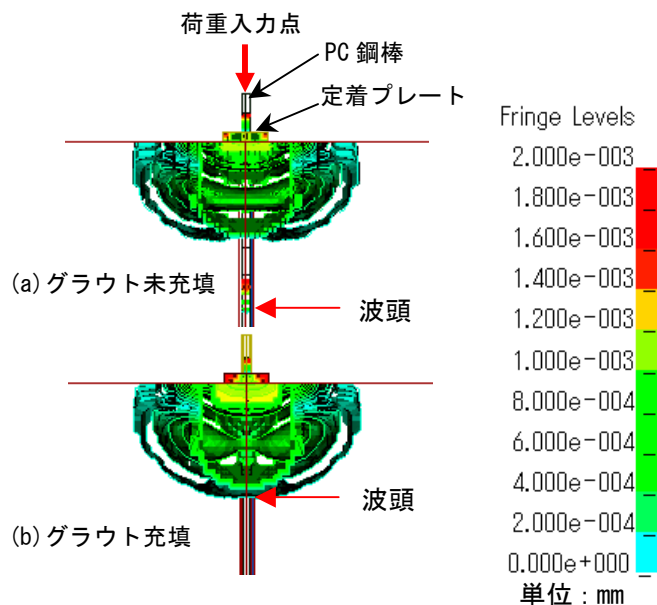


図-5 入力より120 μ s経過後の変位分布

波から独立した波が伝播していることも示されている。

これらの理由として、まず、グラウト未充填の場合では、鋼棒に入力された弾性波がそのままPC鋼棒を通る成分と定着プレートを介してコンクリートに伝わりコンクリート部を伝播する成分とがそれぞれ存在している。そのため、

弾性波伝播速度の速いPC鋼棒中を伝播してきた波が入力点とは反対側の定着プレート上に変位を発生させることにより、波形が急激に鋭く立上がったと考えられる。

これに対して、グラウト充填の場合では、鋼棒に入力された弾性波が定着プレート、グラウトおよびシースを介してコンクリート部へ伝わり、一体化した波として伝播する。これによって、PC鋼棒中を伝播する波は弾性波伝播速度の遅いコンクリートとともに変形しながら伝播方向に進むものと考えられ、グラウト未充填よりは相対的に変位振幅が小さくなり、高周波成分の割合が相対的に少なくなったと考えられる。

これらより、本手法において、波形特性をもとにグラウト充填の有無が評価できる原理的な背景としては、入力された弾性波において、PC鋼棒のみを伝播する成分の有無が主要要因となっているものと考えられる。

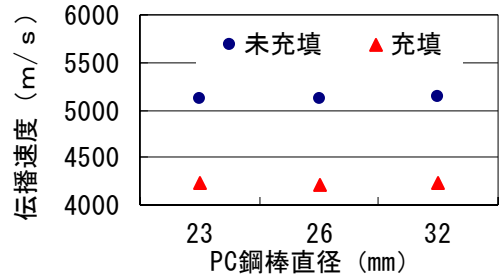
3.2 構成部材寸法と伝播速度の関係

図-6は、PC鋼棒直径の異なるモデルおよびスラブ厚さの異なるモデルにおいて得られた伝播速度を示す。これによれば、いずれの場合においても、伝播速度は、グラウト未充填の場合では、約5100m/sに、一方、グラウト充填では、約4200m/sであり、いずれも寸法の違いによってほとんど変化しないことがわかる。

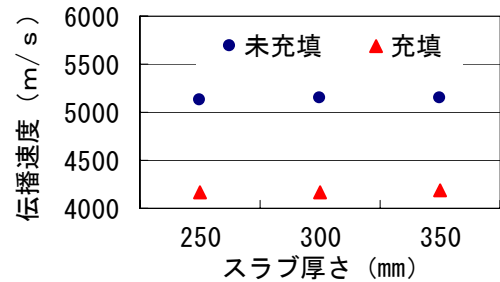
既往の研究⁵⁾によると、コンクリート中の鉄筋の超音波伝播速度は、鉄筋直径の増加とともに大きくなる傾向があると報告されている。これと本解析の結果とは異なるが、解析における衝撃荷重の継続時間 T_c (40 μ s) を式(1)⁶⁾に

$$F_{\max} = 1.25/T_c \quad (1)$$

代入して求められた上限入力周波数 F_{\max} は31.25kHzとなり、一般的な超音波計測で対象としている周波数よりかなり低いことと、本研究に用いたPC鋼棒直径が長さに対して十分に小さいことから、伝播速度にその影響が現れていないものと考えられる。これより、本研究の範

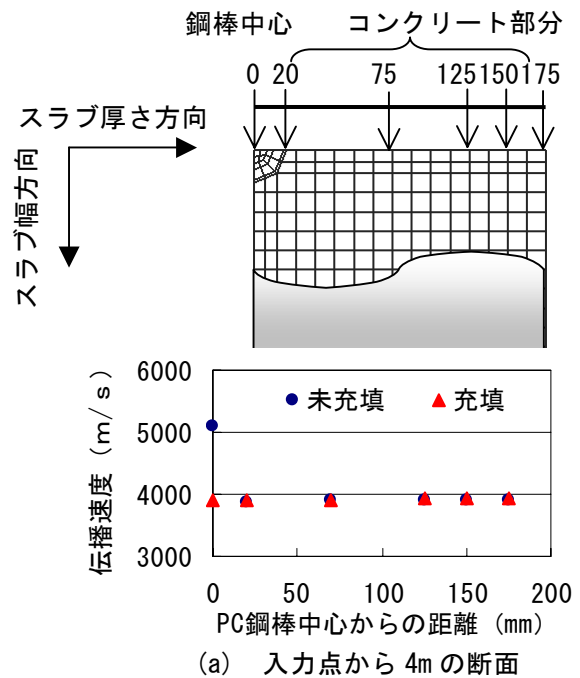


(a) PC鋼棒直径と伝播速度の関係

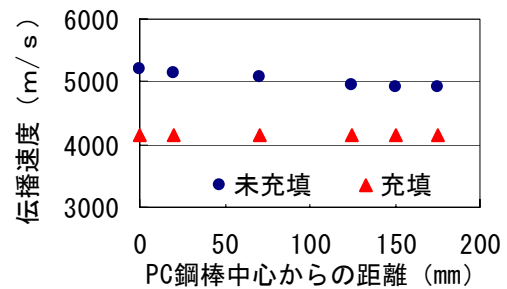


(b) スラブ厚さと伝播速度の関係

図-6 構成部材寸法と伝播速度の関係



(a) 入力点から4mの断面



(b) 入力点から6mの断面

図-7 断面内の伝播速度の比較

囲内においては、PC 鋼棒直径の違いが伝播速度に与える影響はほとんどないと考えられる。

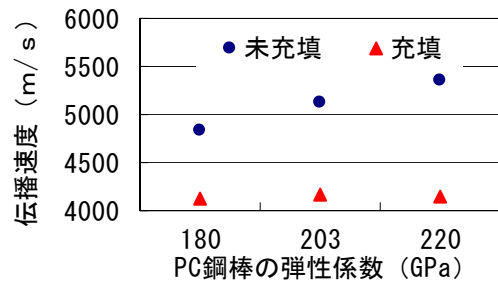
一方、スラブ厚さの違いによっても、伝播速度が変化していないことから、この理由をさらに詳細に検討するため、PC 鋼棒直径 23mm、スラブ厚さ 350mm のモデルにおいて、弾性波入力点から鋼棒軸方向に 4m および 6m 離れた点の断面内において、鋼棒中心および鋼棒中心から断面半径方向に 20, 75, 125, 150 および 175mm 離れた点における伝播速度をそれぞれ求めた。

図-7 はその結果を示している。これより、4m の断面において、鋼棒中心（距離：0m）を除いては、グラウト充填の有無に関わらず、弾性波が断面上にはほぼ同時に到達していることがわかる。入力点より 6m の断面（端部）において、グラウト充填の場合では、断面内のすべての点において伝播速度はほぼ一定である。これに対して、グラウト未充填では、コンクリート上での伝播速度は、いずれの点でも 4m の断面に比べて大きくなり、PC 鋼棒中心から端部に向かって徐々に小さくなっている。これは、グラウトが未充填の場合、PC 鋼棒上を伝播する波が鋼棒端部で反射を起こし、再びコンクリート中に伝播することにより、コンクリート中の見かけの伝播速度が大きくなるためと考えられる。

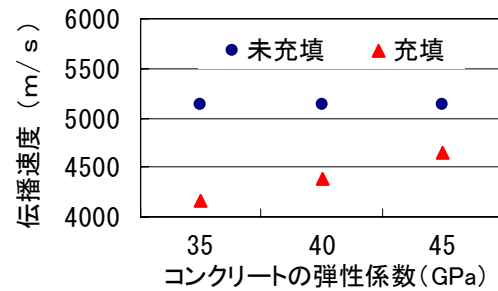
したがって、本研究で用いたスラブ厚さの範囲内では、長さおよび幅に比較して厚さが非常に小さいため、コンクリート内部の厚さ方向においては弾性波の波頭がほぼ平面となって伝わるものと推定され、これによってスラブ厚さは伝播速度にほとんど影響を与えないと考えられる。

3.3 構成材料の弾性係数と伝播速度の関係

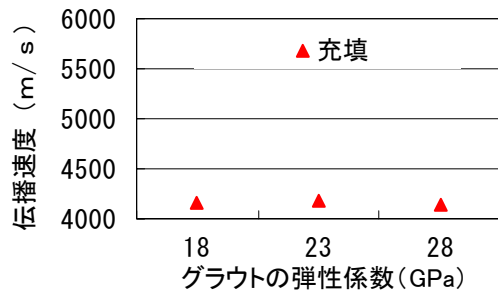
図-8に、構成材料の弾性係数と伝播速度の関係をそれぞれ示す。グラウト充填の場合、伝播速度はPC鋼棒の弾性係数およびグラウトの弾性係数にほとんど影響されずほぼ一定であるが、コンクリートの弾性係数が35, 40, 45GPaの順に増大につれて、伝播速度は徐々に大きくなることわかる。一方、グラウト未充填では、



(a) PC 鋼棒の弾性係数と伝播速度の関係



(b) コンクリートの弾性係数と伝播速度の関係



(c) グラウトの弾性係数と伝播速度の関係

図-8 材料の弾性係数と伝播速度の関係

伝播速度はコンクリートの弾性係数に影響されずほぼ一定であるが、PC鋼棒の弾性係数の増加とともに、徐々に大きくなっている。

周知のように、均一弾性体中における縦波伝播速度 C_L は、式 (2) で表される。一方、一様な弾性棒を伝わる縦波（棒波）の伝播速度 C は、式 (3) で表される。

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

ここで、 E は弾性係数、 ρ は密度、 ν はポアソン比である。

そこで、解析に用いた物性値をそれぞれ以上の計算式に代入し、一様な材料における伝播速

度の理論値を求めて解析結果との比較を行い、材料の弾性係数の影響に関して検討した。その結果、解析に用いたコンクリートの材料物性値を式(2)に代入して得られた縦波伝播速度の理論値 C_L は、それぞれ4110, 4440, 4660m/sとなり、グラウト充填の場合の解析値(図-8(b)参照)とほぼ一致している。また、解析に用いたPC鋼棒の材料定数を式(3)に代入して得られた一様弾性棒の棒波速度はそれぞれ4770, 5070, 5280m/sとなり、グラウト未充填の場合の解析値(図-8(a)参照)に近いことがわかった。

以上のことより、グラウトが充填の場合は、入力された弾性波はコンクリート中にも一体的に伝わり、モデルにおけるコンクリート部分の占める割合が圧倒的に大きいため、伝播速度はコンクリートの縦波弾性波速度の理論値に近くものと考えられる。一方、グラウト未充填の場合では、鋼棒の長さが径に対して十分に長いことから、PC鋼棒を伝播する波が棒波となって伝わることによって、解析による伝播速度がPC鋼棒の棒波速度に近づいたものと考えられる。

したがって、本手法を用いてPCグラウト充填評価を行う場合、伝播速度がコンクリートの縦波速度の理論値より小さくなっていればグラウト完全充填と判断できる可能性がある。また、伝播速度がPC鋼棒の棒波速度に近い値を示していれば、グラウトの未充填箇所が存在すると判断できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 本研究の範囲内においては、PC鋼棒の直径(23~32mm)は伝播速度にほとんど影響を与えないことがわかった。
- 2) 本研究の範囲内においては、スラブ厚さ(250~350mm)も伝播速度にほとんど影響を与えないことがわかった。
- 3) 伝播速度は、グラウト未充填の場合において、その値がPC鋼棒の棒波速度に近く、グラウト充填の場合はコンクリートの縦波速度に近いことがわかった。これらの知見を用いれば、グラウト充填評価のための伝播速度の基準値を決定することが可能となることを解析的に示した。

なお、本研究で用いたモデルは、すべての構成材料の接合面における節点を共有させ一体化したものである。しかしながら、異種材料界面における力の伝達機構については、検討が不足している部分もあり、今後の課題である。また、本手法の実用化にあたっては、構造物におけるコンクリートの密度や弾性係数のバラツキも考慮する必要があると考えられ、さらに現場適用性について検証する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 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, Vol.61, No.746, pp.25-39, 2003
- 2) 国枝泰祐, 鎌田敏郎, 浅野雅則, 六郷恵哲: PCグラウト充填評価における弾性波パラメータの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1589-1594, 2003
- 3) Carino N.J., Sansalone M.J. and Hsu N.N.: A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, ACI Structural Journal, Vol.83, No.2, pp.199-208, 1986
- 4) 白鳥雅也, 桧貝勇, 岡村雄樹: 軽い衝撃荷重を受けるコンクリート部材の応答解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.679-684, 1992
- 5) Chung H.W.: Effects of embedded steel bar upon ultrasonic testing of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.30, No.102, pp.19-25, 1978
- 6) Sansalone M.J., and Streett W.B.: Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997