

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

鎌田敏郎¹・浅野雅則²・国枝泰祐³・国枝稔⁴・六郷恵哲⁵

¹正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

²学生会員 工修 岐阜大学大学院 工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

⁴正会員 工博 岐阜大学助手 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

⁵正会員 工博 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

本研究は、衝撃弾性波法をPCグラウトの充填評価に適用する場合において有効となる弾性波特性パラメータについて検討を行ったものである。弾性波特性パラメータとしては、弾性波伝播速度、立上がり時間および周波数分布に着目した。まず、スラブ供試体(その1)実験において弾性波伝播速度とグラウト充填度の関係を検討した。また、供試体内部における弾性波伝播挙動を把握する目的で3次元FEM解析を行い、グラウトの存在により弾性波伝播速度が変化する理由について考察を行った。続いて、新たにスラブ供試体(その2)を作製し、PC部材を構成する材料の違いが弾性波特性パラメータに与える影響を検討した。さらに、実物PCタンクにおいて実証実験を実施し、本手法の実構造物への適用性を確認した。

Key Words : *nondestructive tests, Impact Elastic-Wave Methods, PC structure, propagation velocity, risetime, frequency distribution*

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鋼材を腐食から保護するうえで非常に重要な役割を担っている。このため、グラウト施工時に何らかの原因でグラウト充填不良箇所が発生した場合は、早期にPC鋼材が腐食し破断に至る可能性があるなど、構造物全体の耐久性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。したがって、新設構造物における施工検査あるいは既設構造物の健全性診断において、グラウトの充填状況を確認する意義は極めて大きい。

グラウトの充填状況は目視により把握することが困難であるため、特に構造物内部の状況の評価できる非破壊試験法を適用することが必要¹⁾である。

このうち、X線法を適用する手法²⁾がある。これによれば、X線透過画像を用いることによりグラウト未充填部分が視覚的に確認できるものの、X線の透過可能なコンクリート厚さは数10cm程度が限界であり、さらに安全管理やコストの面で問題があることから、現段階では実用上最適の手法とは言い難い。

一方、超音波法を用いた手法の研究³⁾が行われている。評価指標として反射波の周波数分布を用いた結果、低周波領域のスペクトルピーク位置の変化によりグラウトの有無が評価できる可能性が示されている。しか

しながら超音波は、コンクリート中での減衰が大きいことため伝播距離を大きくすることが難しく、適用可能な部材厚さの面で問題を残している。

これに対し衝撃弾性波法⁴⁾は、入射する弾性波のエネルギーが超音波に比べ大きく、波長も長いことから、コンクリート中での減衰の影響を受けにくいところが利点と考えられる。この手法に分類される方法として、Impact-Echo Method⁵⁾がある。この方法は、部材の断面方向に弾性波を伝播させ、鋼球落下等により衝撃を与えたコンクリート表面の直下にあるシーす内部のグラウト充填状況の評価するもの⁶⁾である(図-1参照)。言い換えれば、シーすの長手方向におけるある局所的な部分の充填状況が評価できるのみであり、例えば、詳細検査において点的な評価を行う場合に有効と考えられる。

一方、Impact-Echo Methodと異なり、部材全体におけるグラウト充填状況を概略的に評価するために衝撃弾性波法を適用する手法の研究としては、PC鋼材端部の近傍を打撃することにより、PC鋼材軸方向に向かつて弾性波を伝播させ(図-2参照)、得られた周波数分布やエネルギーなどによりグラウトの有無を判断するもの^{7)~10)}がある。これらの手法は周波数分布やエネルギーとグラウト充填度との定量的な関係が明確には示されておらず、グラウト充填程度の客観的な評価手法

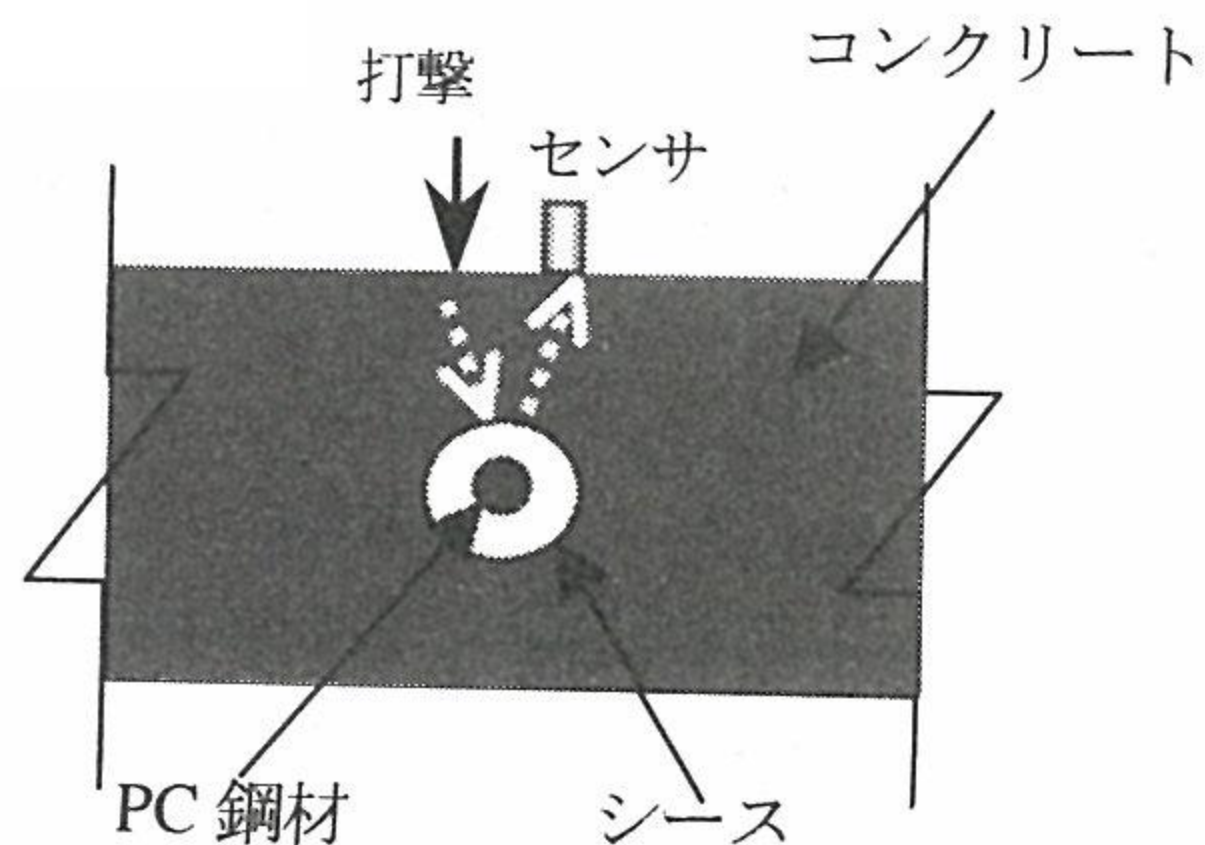


図-1 Impact-Echo Method

にまでは至っていない。

このような背景を踏まえて、本研究では、上記衝撃弾性波法のうち、PC鋼材軸方向に弾性波を伝播させる手法を対象とし、グラウト充填評価における弾性波特性パラメータの適用性および有効性をより詳細に明らかにすることを目的とした。パラメータとしては、弾性波伝播速度、立上がり時間¹⁾および周波数分布を用いた。

検討の手順としては、スラブ供試体(その1)において衝撃弾性波計測を実施し、グラウト充填度と弾性波伝播速度との関係について検討した。ここでは、供試体両端部に保護コンクリートを打設し、PC鋼材を直接打撃できない場合についても同様の実験を行い、その影響についても検討した(2章)。

続いて3次元FEM解析を用いて、供試体内部における弾性波伝播挙動を把握し、視覚的にグラウトの存在が弾性波伝播速度に与える影響について考察を行った(3章)。

一方、実構造物への本手法の適用を考慮して、PC部材を構成する材料が異なる場合に対する検討をスラブ供試体(その2)を用いて行った(4章)。ここでは弾性波伝播速度に加えて波形の立上がり時間および周波数分布に対しても検討を行い、各パラメータとグラウト充填度の関係および構成材料の影響について詳細な検討を加えた。

さらに実物PCタンクに本手法を適用し、各パラメータの感度および適用性を確認した(5章)。

2. 弾性波伝播速度とグラウト充填度との関係

ここでは、弾性波伝播速度とグラウト充填度との関係を明らかにするための実験を行った。グラウト充填度を段階的に変化させた場合における弾性波伝播速度の変化の傾向を明らかにし、グラウト充填評価パラメータとしての弾性波伝播速度の感度を検討した。

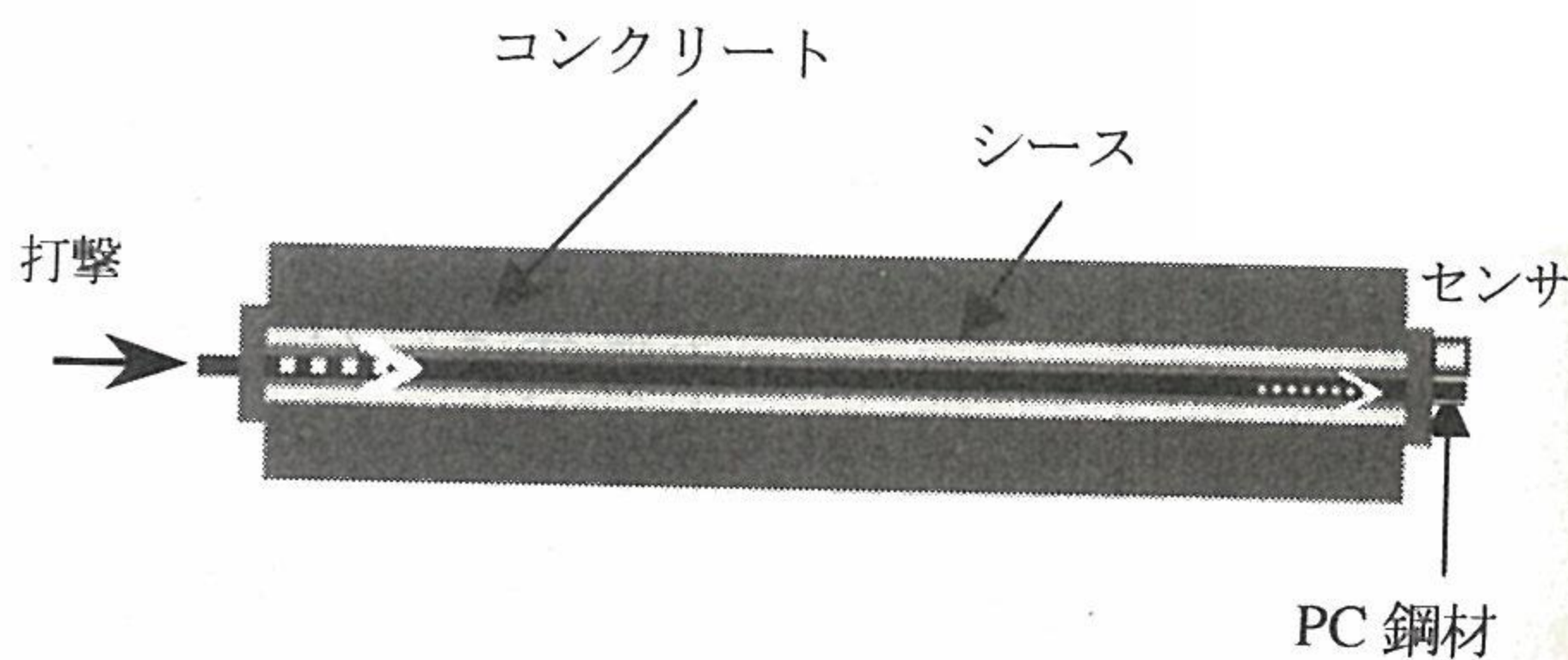


図-2 PC 鋼材軸方向への弾性波伝播

(1) スラブ供試体概要

本実験では、写真-1および図-3に示すPCスラブ供試体(これをスラブ供試体(その1)とする)を用いた。コンクリートおよびグラウトの水セメント比はそれぞれ37%および45%であり、シーブにはコンジットシーブφ35、PC鋼材にはPC鋼棒B種1号φ23を用いている。スラブ供試体内部は、グラウト充填度の違いが弾性波

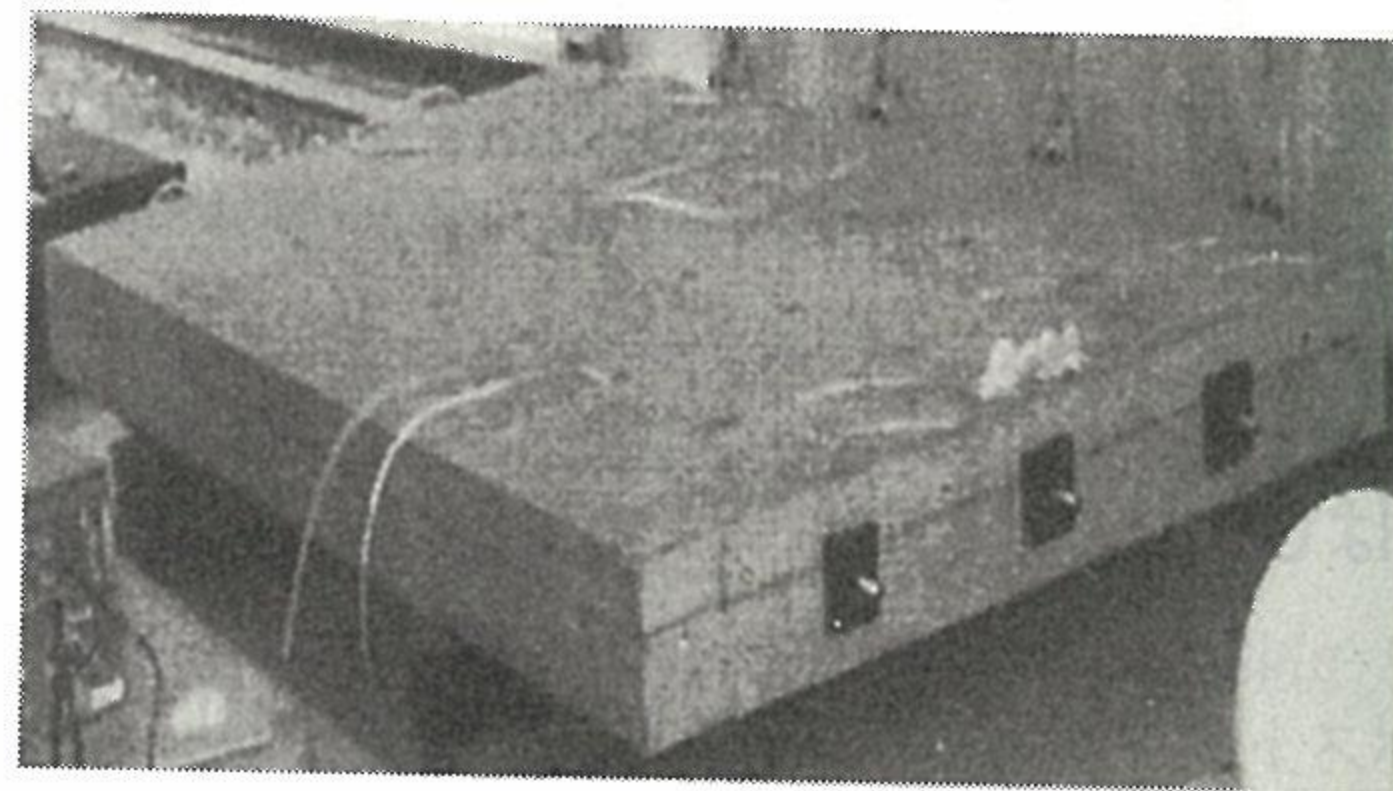


写真-1 スラブ供試体全景

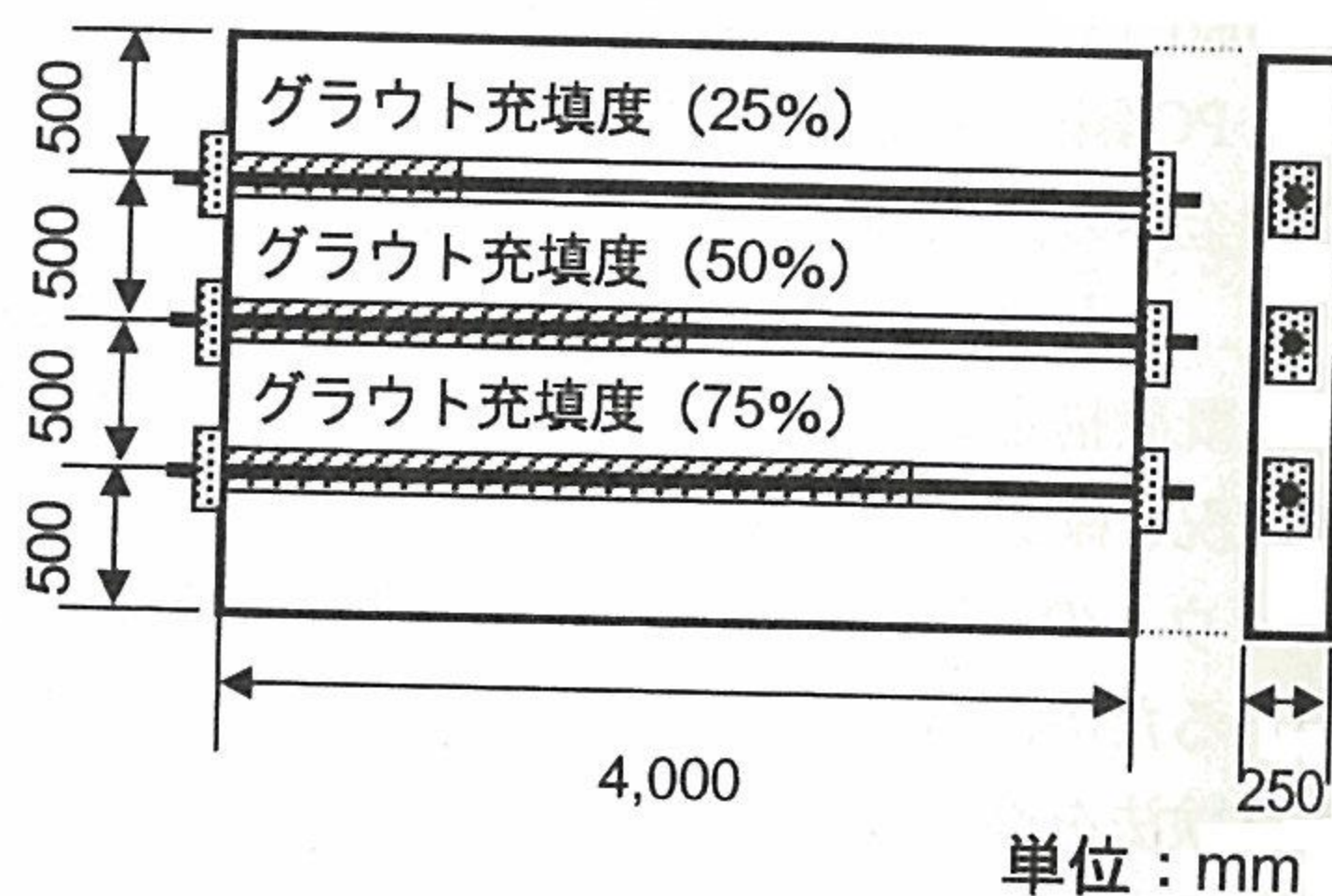


図-3 スラブ供試体

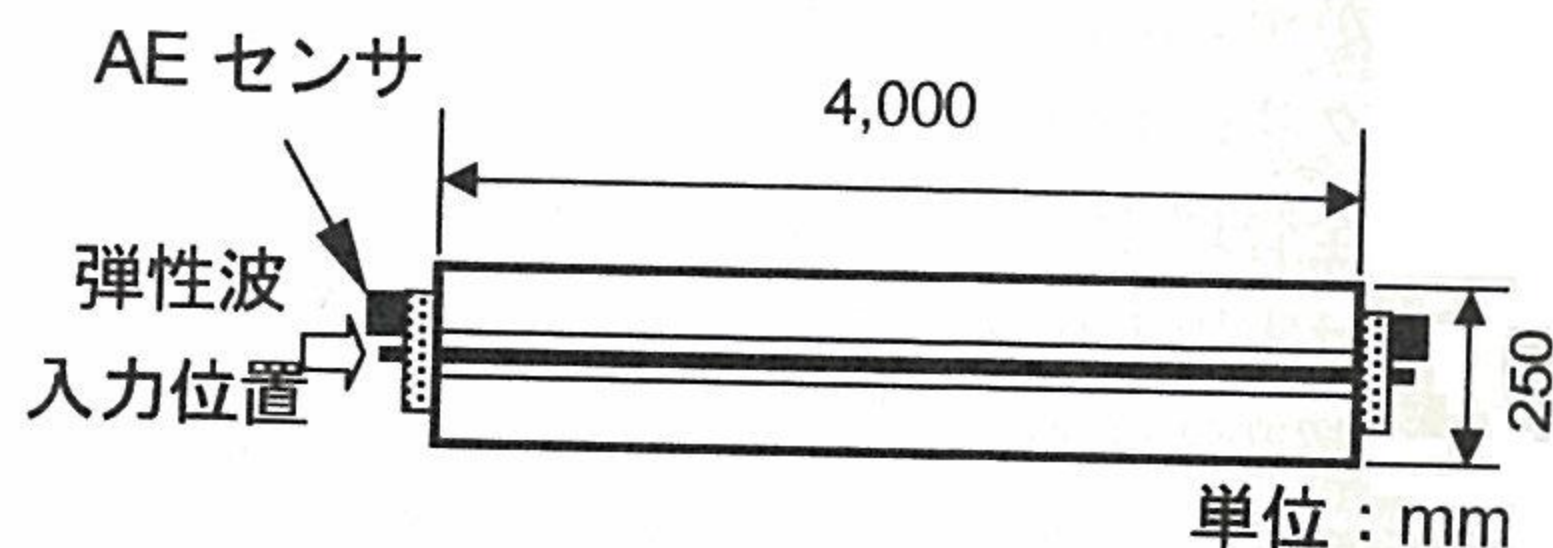


図-4 弾性波入力位置および受振位置

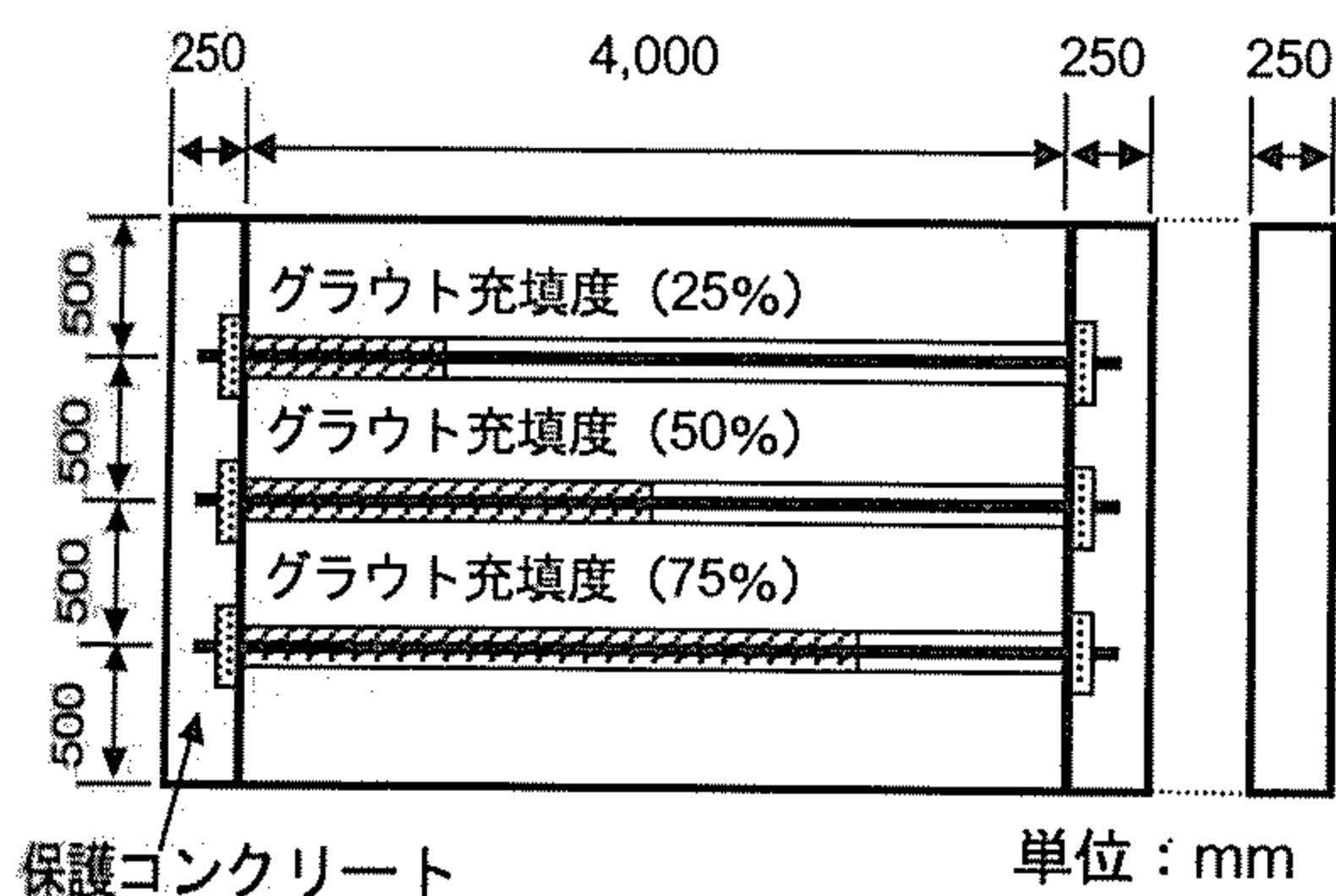


図-5 保護コンクリート供試体

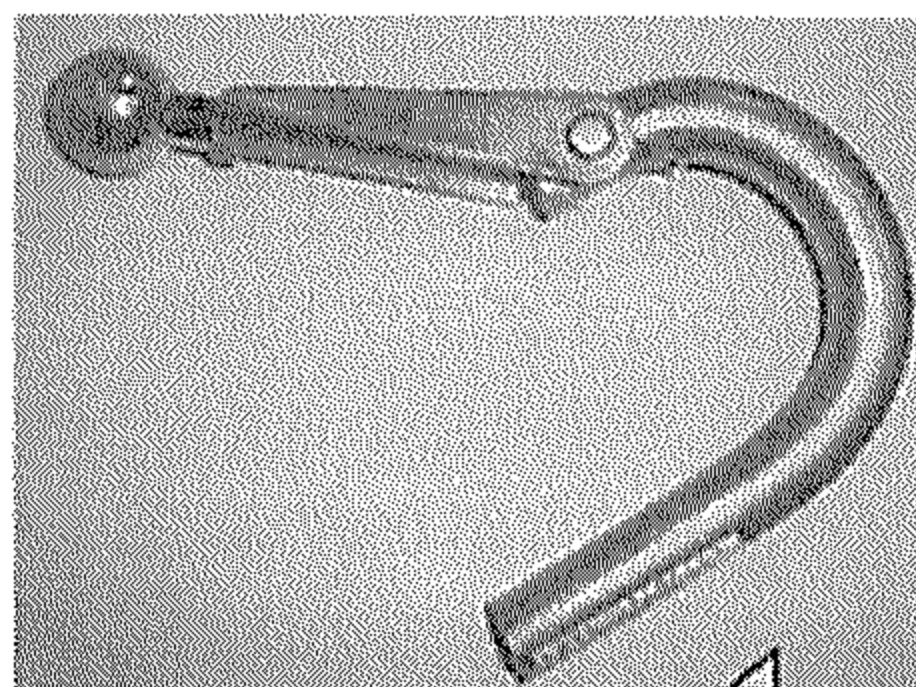
伝播速度に与える影響を検討するため、グラウト充填度を0%（シース内にグラウトが充填されていないもの）、25、50、75（図-3参照）および100%（シース内にグラウトが完全に充填されているもの）と変化させてある。なお、所定のグラウト充填度とするために、シース内においてグラウト充填度に応じて所定の位置に発泡スチロールと止水材を用いて境界部を設け、その後グラウトを注入した。

(2) 計測概要

弾性波の入力位置および受振位置を図-4に示す。弾性波の入力には、写真-2に示すような一定の衝撃を与えることができる打撃装置を用いた。この装置の打撃部は鋼製で球状となっており、パルス状の弾性波を入力することができる。入力位置は、グラウト充填側（図-3における左側端部）のPC鋼棒端部の中央部分とした。弾性波の受振には150kHz共振型のAEセンサを用い、伝播時間の計測にはデジタルAE計測システムを用いた。弾性波伝播速度は、センサ間距離を伝播時間により除したものとして求めた。センサの貼り付け位置は、PC鋼棒両端部の定着プレート上とした。

(3) 保護コンクリート供試体

ここでは、さらに、図-5に示すように、(1)で示したスラブ供試体（その1）のPC鋼棒両端の露出部分を保護コンクリートで覆い、より実構造物に近い状況での実験を加えた。なお、保護コンクリート打設後のスラブ供試体を、「保護コンクリート供試体」として、スラブ供試体（その1）と区別する。弾性波の入力位置および受振位置を図-6に示す。弾性波の入力位置はPC鋼棒延長上の保護コンクリート部分とした。また、AEセンサの貼り付けを、弾性波入力位置近傍および反対側のコンクリート側面の中央部分とした。その他の計測条件は(2)の記述と同様にした。



拡大

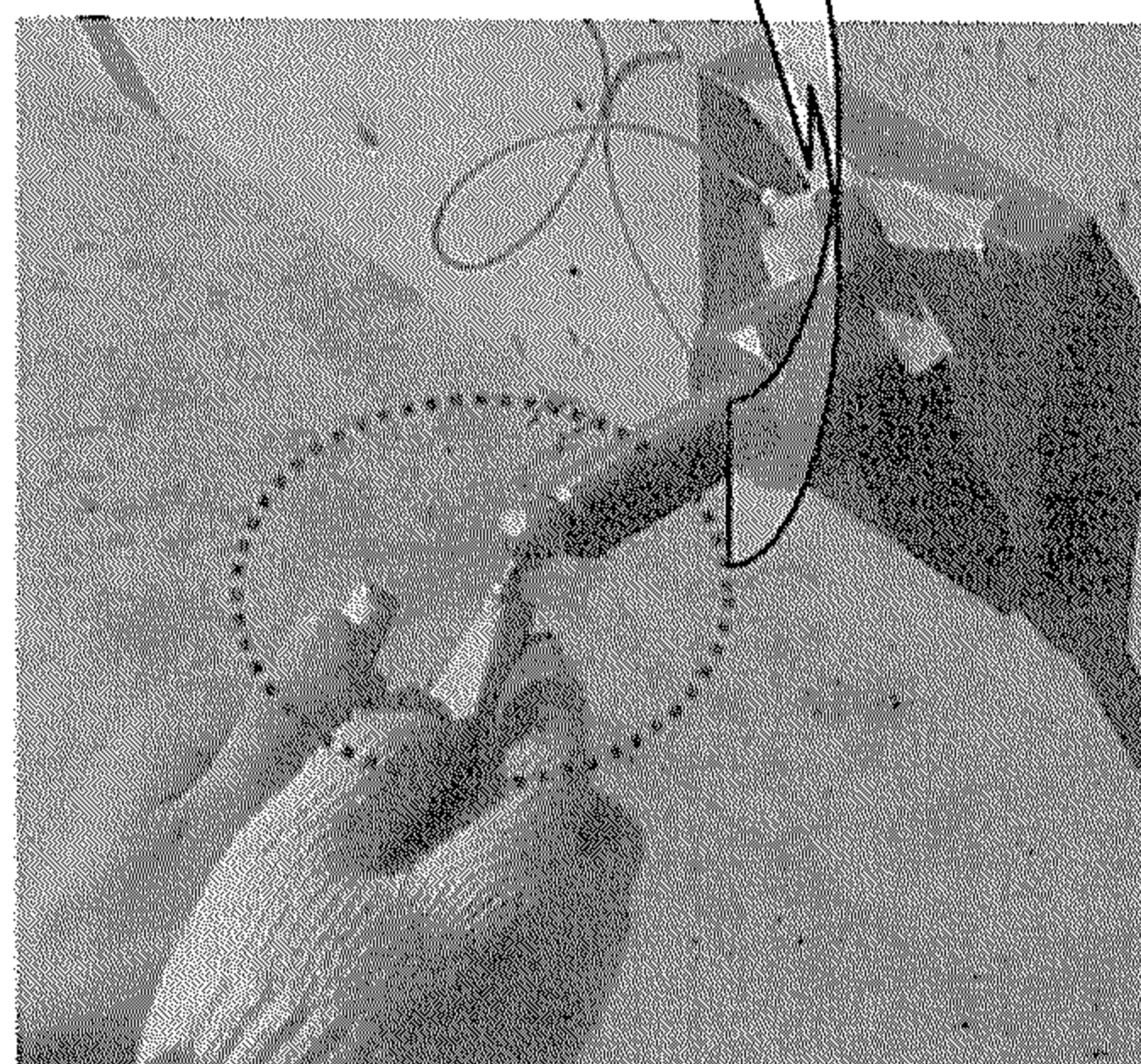


写真-2 打撃装置

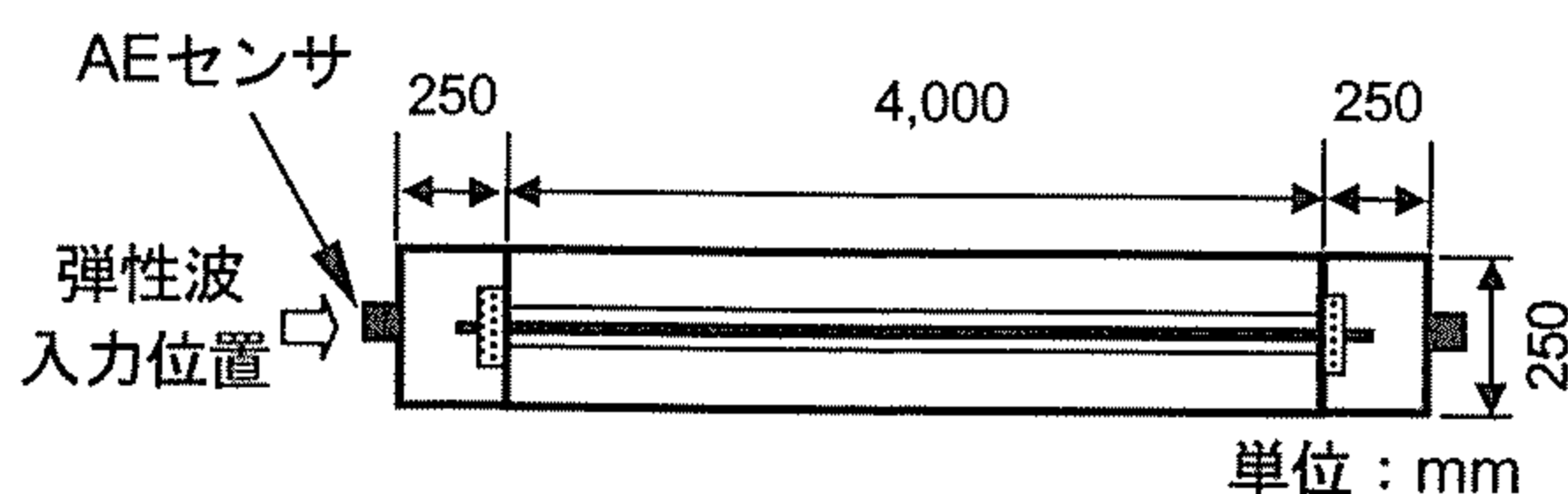


図-6 弾性波入力位置および受振位置

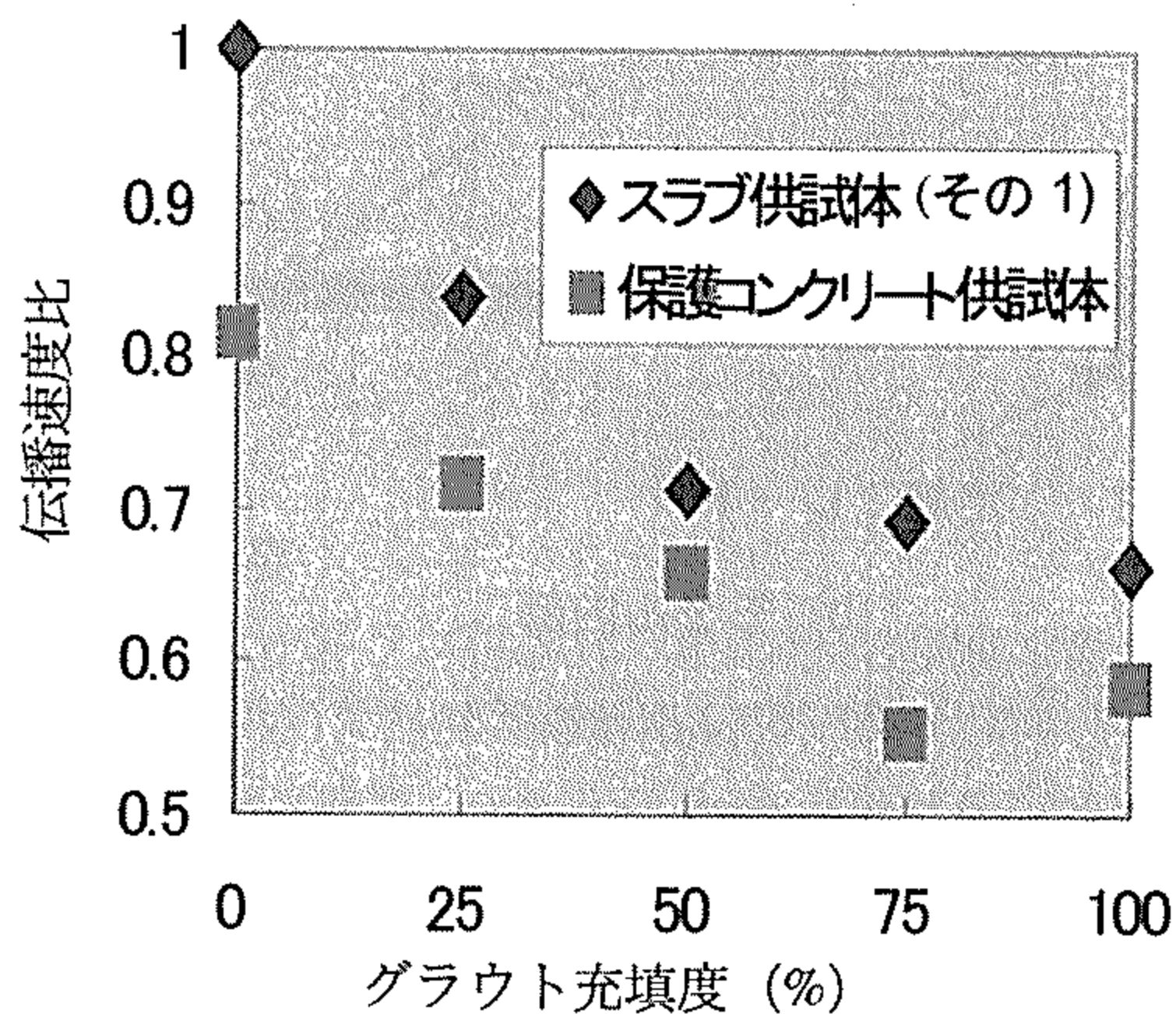


図-7 グラウト充填度と伝播速度比の関係

(4) 結果および考察

図-7にスラブ供試体（その1）および保護コンクリート供試体におけるグラウト充填度と伝播速度比の関係を示す。ここで示した伝播速度比とは、スラブ供試

体（その1）におけるグラウト充填度0%の場合の伝播速度に対する比率である。これによると、保護コンクリートの有無にかかわらずグラウト充填度が高くなるに従って、伝播速度比が徐々に小さくなっていく傾向が見られる。グラウト充填度が0%の場合は入力された弾性波がPC鋼棒のみを伝播するのに対して、グラウト充填部分では鋼棒とグラウトが一体となった複合部材中を伝播し、PC鋼棒のみの場合と伝播挙動が異なるものと考えられる。したがって、入力された弾性波がグラウトとPC鋼棒の複合部材中をより長く伝播する（グラウト充填度が高くなる）ほど、その影響が大きく現れたためと考えられる。また、保護コンクリート供試体の伝播速度比は、スラブ供試体の伝播速度比よりも小さくなっている。この理由としては、まず、保護コンクリートの厚み（2×250mm）の分だけコンクリートのみ（PC鋼棒単体よりも弾性波伝播速度は小さい）を透過することが違いとなって現れたものと考えられる。さらに、衝撃の作用箇所の材質が異なる（鋼材とコンクリート）場合は、衝撃の継続時間にも違いが生じ、入力波の周波数特性が変化したことによる可能性も考えられるが、これは今後の検討課題である。

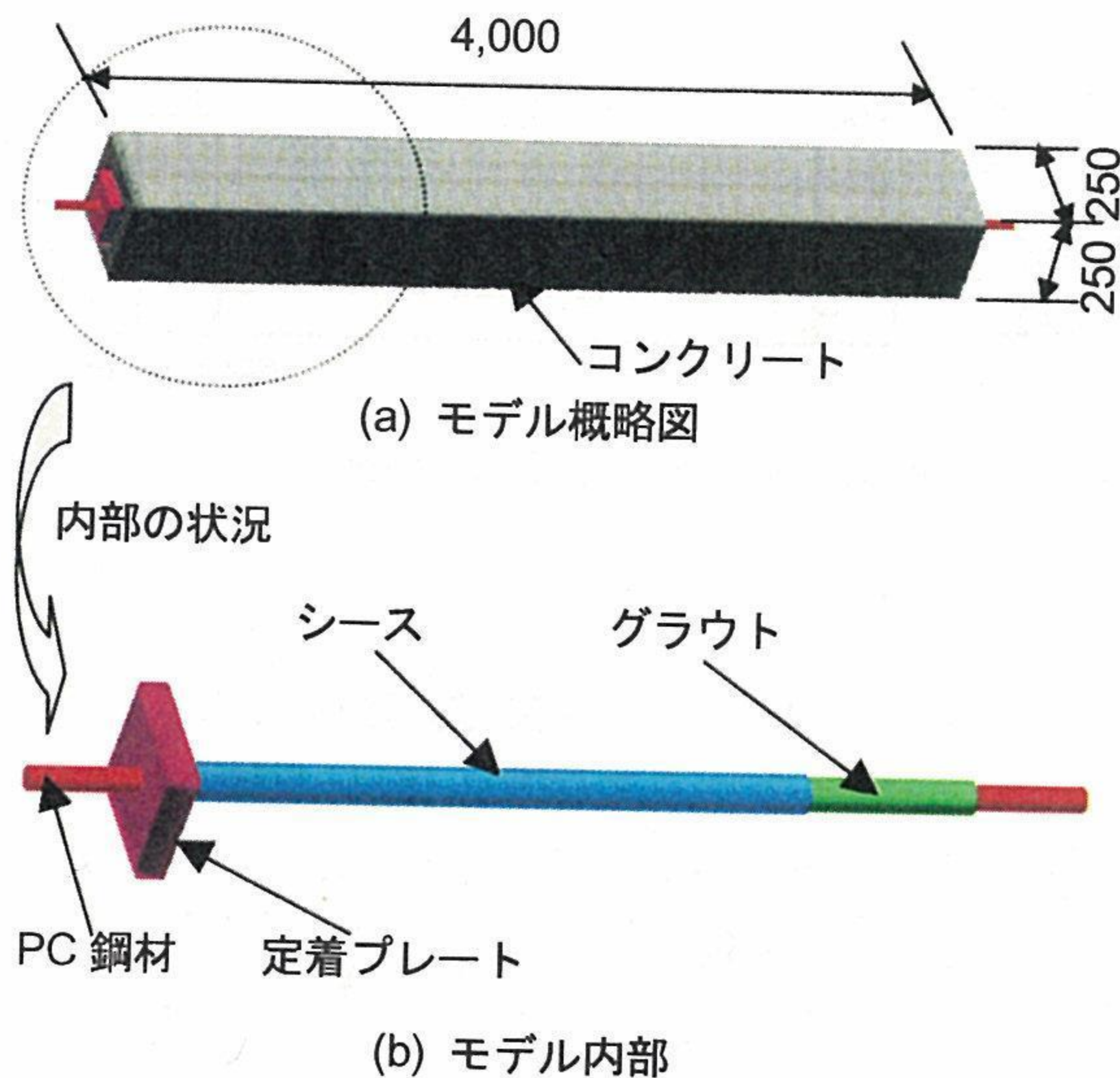


図-8 3次元モデル

表-1 解析条件

構成材料	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	弾性係数 (GPa)
コンクリート	2.3	0.2	31.0
グラウト	1.8	0.2	23.3
鋼材	7.9	0.3	203.3

3. 簡易モデルによる弾性波伝播挙動の把握

2章での検討により、弾性波伝播速度を用いたグラウト充填評価の可能性が実験的に示された。ここでは実験により得られた結果が生じたメカニズムについて、理論的背景を確認するために、グラウトの存在が供試体内部での弾性波伝播挙動に与える影響を、3次元簡易モデルを用いた有限要素法により解析的に検討した。

(1) 解析概要

ここでは、弾性波の伝播挙動を把握するため、PC鋼材にグラウト、シースおよびコンクリートを複合させた3次元の簡易モデル（図-8参照）を作成し、この端部に衝撃荷重を与えることにより生じる部材内部での応答変位の分布を求めた。表-1に、解析に使用した主な構成材料の特性を示す。本解析で用いた構成材料は、すべて線形弾性体として扱った。

このモデルにおいては、グラウト充填度を0%、50%（図-8の中央部分から左半分がグラウト充填部分）および100%と変化させた。モデルに入力する衝撃荷重は、鋼材端部の中央に作用する節点荷重として、図-9に示す波形を用いた。

(2) 結果および考察

解析により得られた供試体内部での弾性波伝播挙動を、グラウト充填度が0、50%および100%の場合について、それぞれ図-10~12に示す。図中の右上の数字は、打撃入力開始後の経過時間を示す。また、図における色の違いは変位の大きさの程度を表している。さらに、弾性波伝播方向に対して、弾性波が到達した先端部分を「弾性波の波頭」として矢印で示した。なお、ここではモデルにおける変位分布をよりわかりやすく表すため、側面図として示している。

グラウト充填度が0%の場合（図-10）、PC鋼材端部で入力され、鋼材部分をダイレクトに伝播する部分と、定着プレートを介してコンクリートに伝わりコン

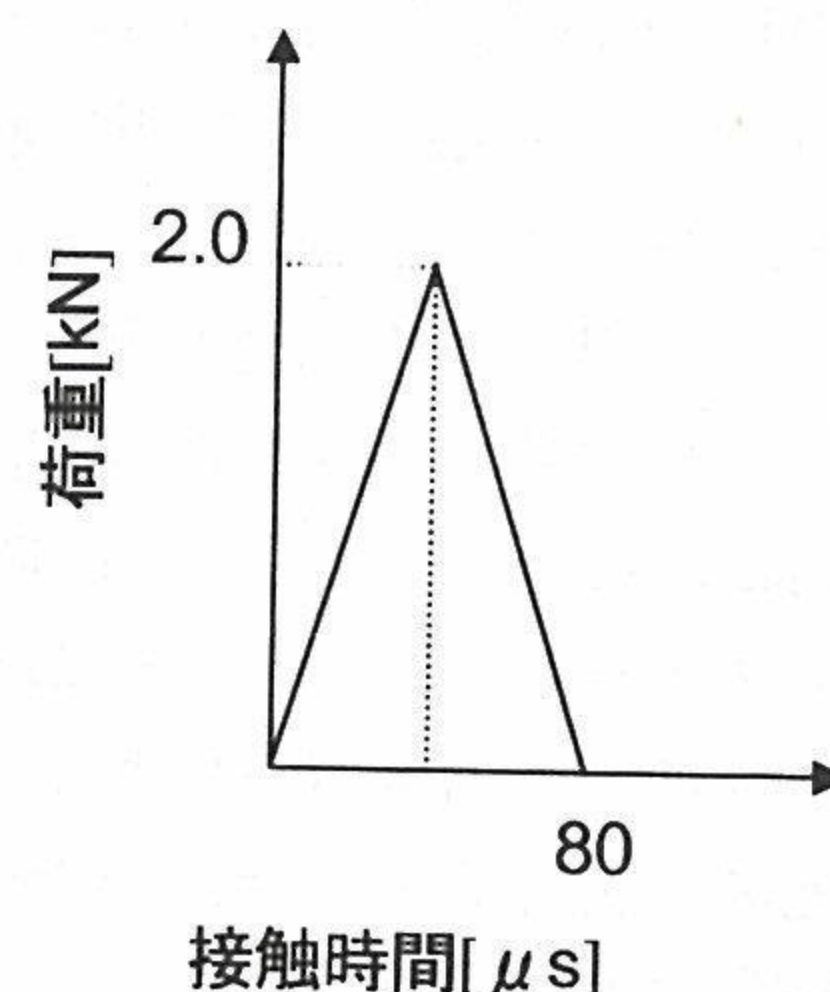


図-9 入力波形

クリート部分を伝播する成分とがそれぞれ独立に存在し、それぞれの波頭位置も異なっていることがわかる。

これに対し、グラウト充填度が50%の場合(図-11) 0.4msecの時点では、コンクリートおよび鋼材での弾性波の波頭位置は一致しているが、0.8msecでは、図-10と同じく、コンクリート部と鋼材部とでは波頭位置が異なっている。これは、モデル中央より左半分がグラウト充填部となっており、この区間ではコンクリートと鋼材とが一体とみなせる挙動を示したことに対応していると考えられる。

一方グラウト充填度100%では(図-12)、弾性波は、経過時間にかかわらず、鋼材、グラウトおよびコンクリート中を一様な速度で伝播しており、他のケースでみられた波頭位置の違いは認められない。

これにより、グラウトが存在することによって、モデル内部での弾性波伝播挙動の違いが視覚的に明らかになった。また、弾性波の波頭位置に着目すると、グラウト充填度が大きいケースほどグラウトの拘束による影響が大きくなるため、同一経過時間での比較において、荷重入力位置から波頭までの距離が短い。すなわち、伝播速度が遅くなる傾向がある。これは図-7における実験結果の傾向と一致しており、解析の面からも、弾性波伝播速度を用いることの有効性が確認できた。

このモデルでは、実験対象および実現象とは異なる面があるものの、みかけの伝播速度に差異が生じるメカニズムについてはある程度理解できたものと考えられる。

4. PC部材の構成材料が各パラメータに与える影響

2章および3章で示した実験および解析条件の範囲内では、伝播速度はグラウト充填評価に有効であることがわかった。しかしながら、PC鋼材としてはPC鋼棒、シースとしてはコンジットシースのみを対象とした検討であるため、これらと異なる構成材料を用いた場合についても確認しておくことが望ましい。また、構成材料の違いおよびグラウト充填度の違いが、すでに検討した伝播速度のみならず立上がり時間や周波数分布に与える影響についても明らかにしておく必要がある。例えばこのうち立上がり時間については、PC鋼材周囲にグラウトが存在した場合、PC鋼材中を伝播する弾性波がグラウト部分にも分散することにより減衰し、波形が変形するため立上がり時間が長くなることが予想される。そこで、ここでは新たに全長6mのスラブ供試体(これをスラブ供試体(その2)とする)を用いて、

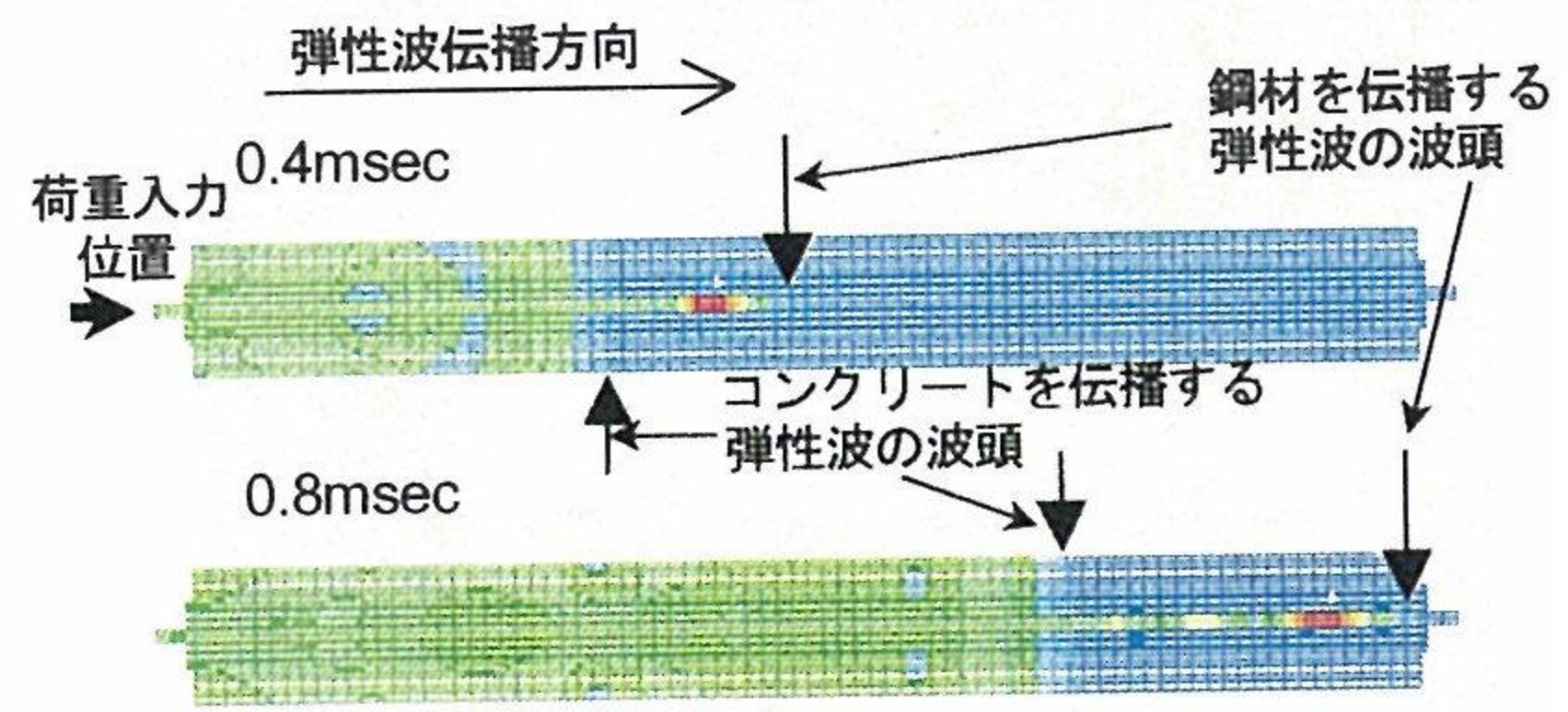


図-10 弾性波伝播挙動
(グラウト充填度 0%)

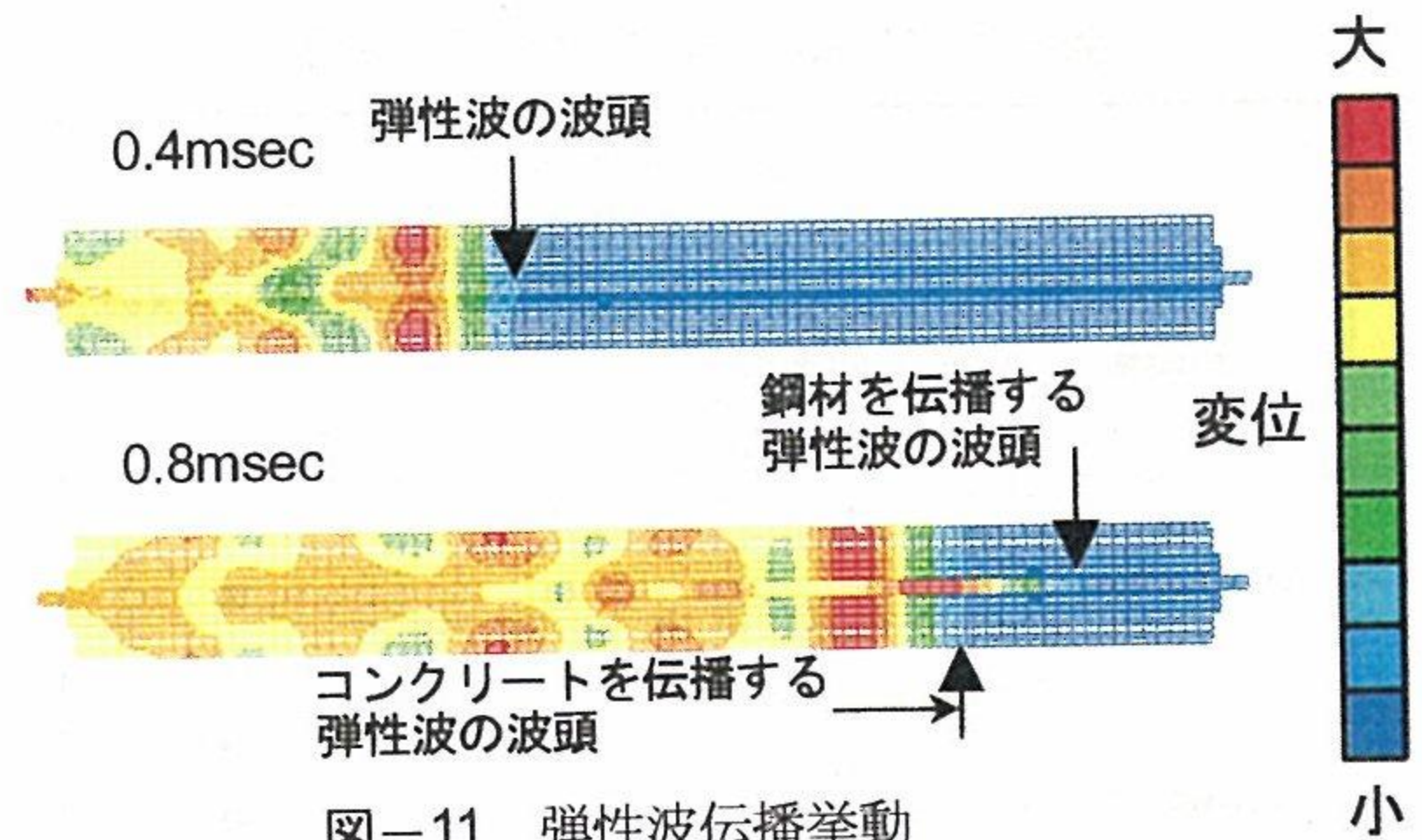


図-11 弾性波伝播挙動
(グラウト充填度 50%)

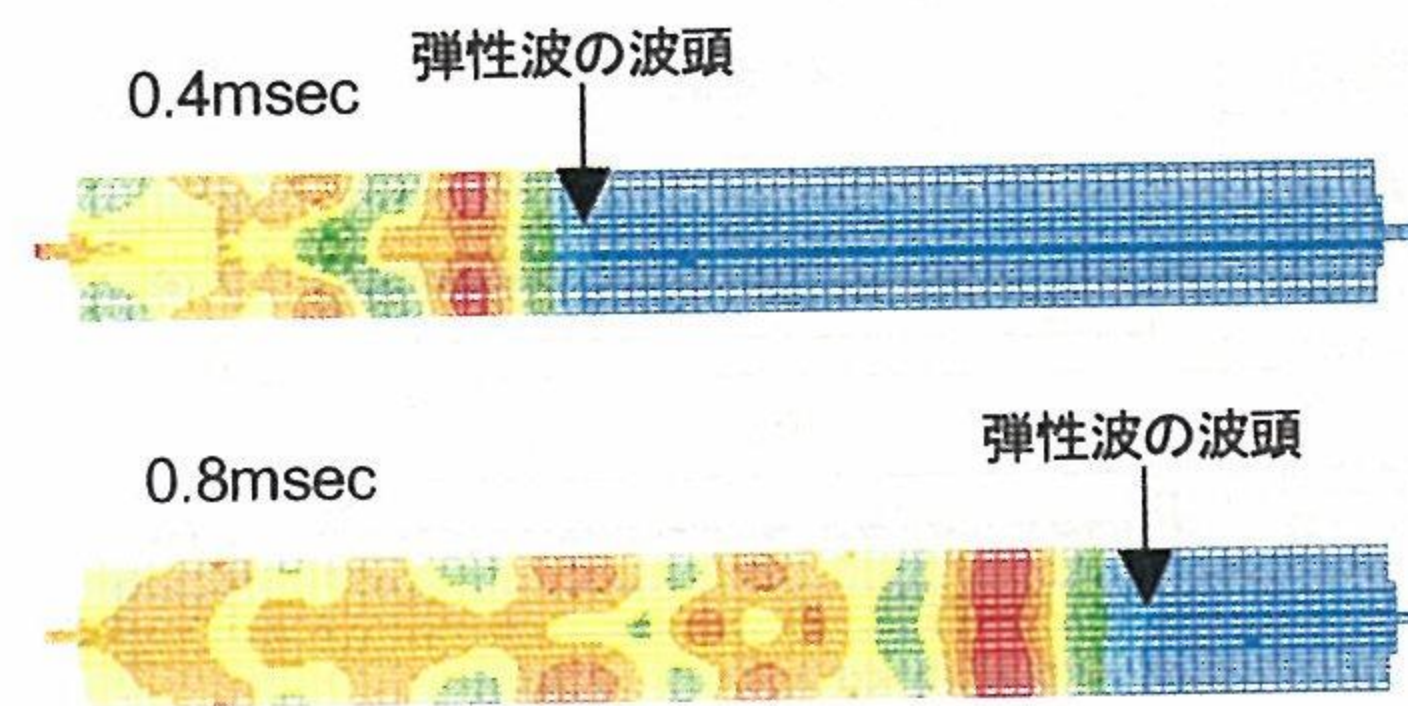


図-12 弾性波伝播挙動
(グラウト充填度 100%)

上記の問題点に関する検討を行った。さらに、グラウトの充填形態(図-13参照)の違いが各種パラメータに及ぼす影響についてもあわせて検討した。

(1) 供試体概要

本実験では、スラブ供試体(その1)と同様な断面形状を有する2,000×250×6,000[mm]のスラブ供試体(その2)を用いた(写真-3参照)。スラブ供試体(その2)の構成材料は、表-2に示すように、PC鋼棒+コンジットシース(以下鋼棒シリーズ)およびPCストランド+スパイラルシース(以下ストランドシリーズ)の2種類である。また、スラブ供試体内部は、グラウト充填度および充填形態の違いが弾性波伝播速度に与える影響を検討するため、グラウトがPC鋼材軸方向に対して体積割合で0%、25%、50%、75%および100%充填された5ケース(図-13および表-2中の(a))、シース全長に

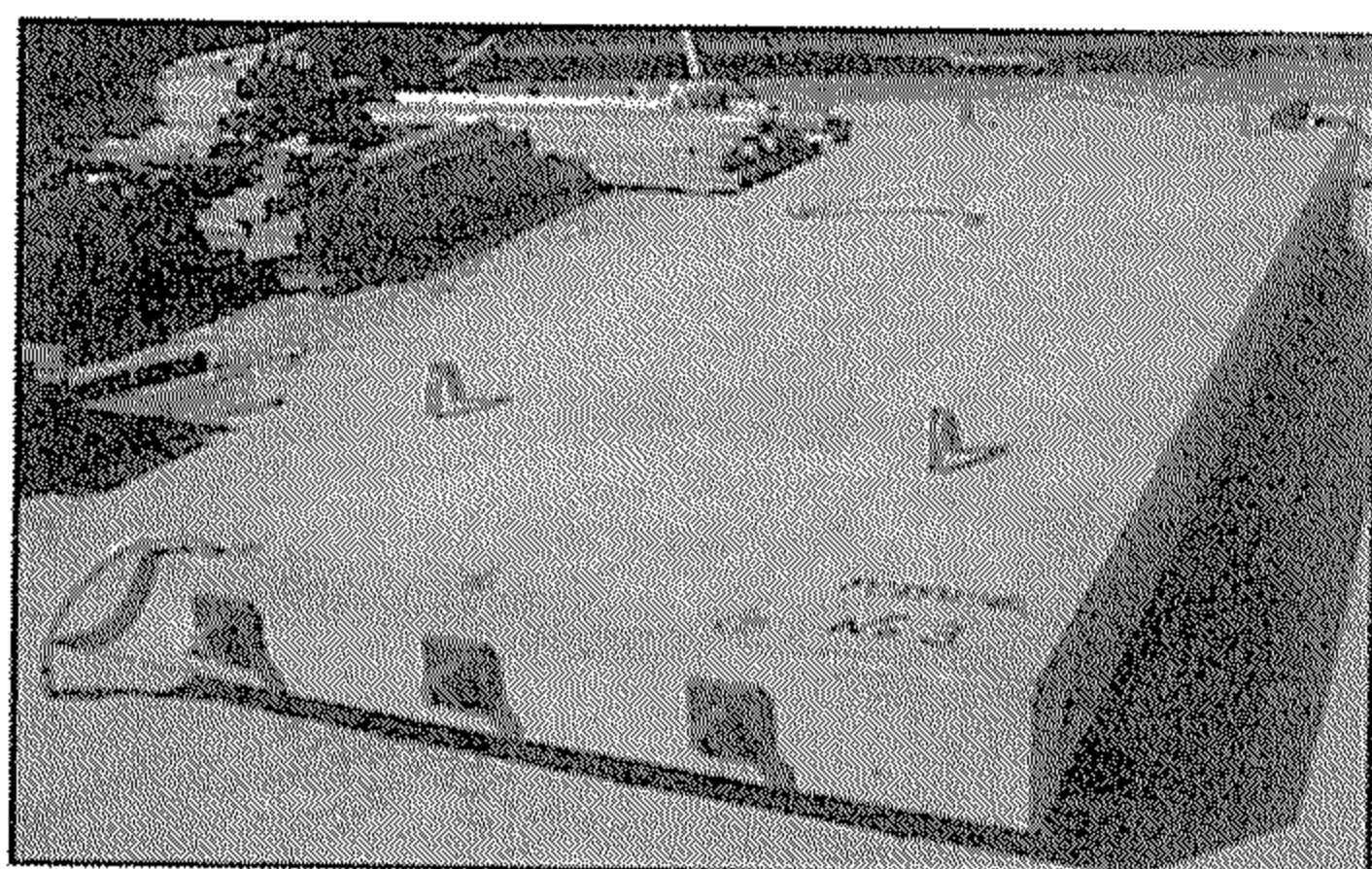


写真-3 スラブ供試体全景

表-2 構成材料およびシリーズ名

		鋼棒シリーズ	ストランドシリーズ
PC鋼材		PC鋼棒(φ23)	PCストランド(φ19.3)
シース		コンジットシース(φ35)	スパイラルシース(φ32)
充填形態	グラウト充填度(%)		
(a)軸方向片側未充填	0	●	●
	25	●	—
	50	●	●
	75	●	—
	100	●	●
(b)断面方向一部未充填	50	●	●
(c)軸方向両側未充填	30	●	●

充填形態	側面図	断面図
(a)軸方向片側未充填 (グラウト充填度: 50%の場合)		
(b)断面方向一部未充填		
(c)軸方向両側未充填		

[単位:mm]

図-13 グラウト充填形態

わたり下半分に充填されたケース(図-13および表-2中の(b), 以下h50とする)およびシース延長において部分的に30%充填されたケース(図-13および表-1中の(c), 以下p30とする)の3通りに対してそれぞれ実験を行った。

(2) 計測概要

弾性波の入力には、2章の(2)に示した打撃装置を用いた。打撃位置は図-14に示すようにPC鋼材端部とし、グラウト充填側および未充填側の両方について行った。弾性波の受振にはデジタルAE計測システムを用い、2chにて計測を行った。AEセンサ(150kHz共振型)は、コンクリート端部の定着プレートに貼付した。本実験では、2センサ間の伝播時間を計測するとともに、立上がり時間(risetime)の記録も行った。立上がり時間は、図-15に示すように、振幅が最初に

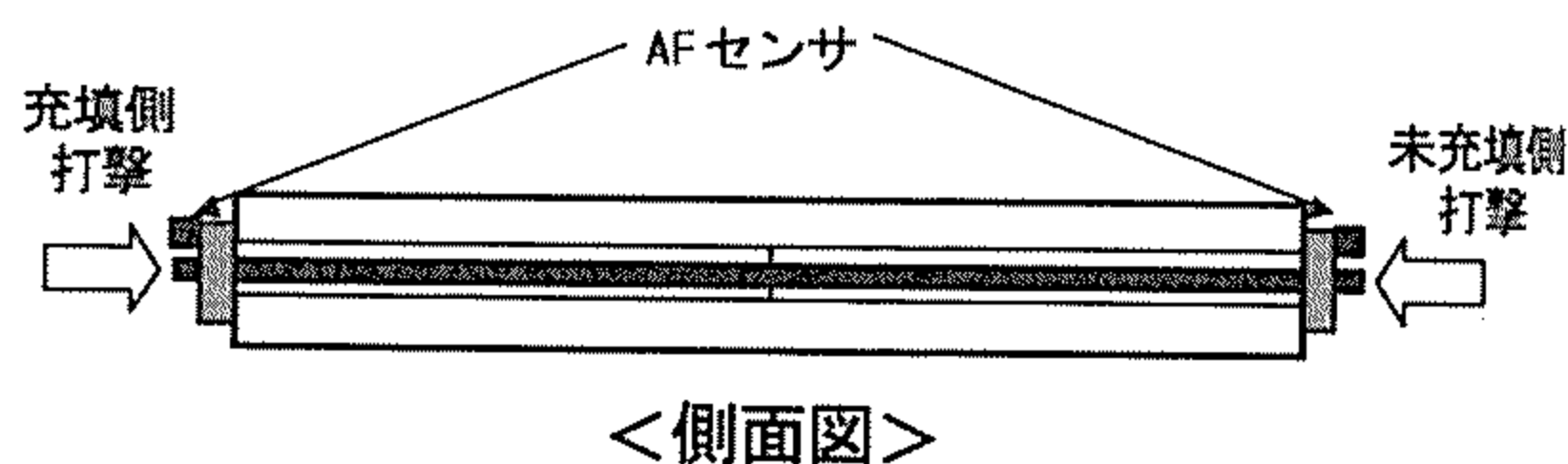


図-14 弾性波入力位置および受振位置

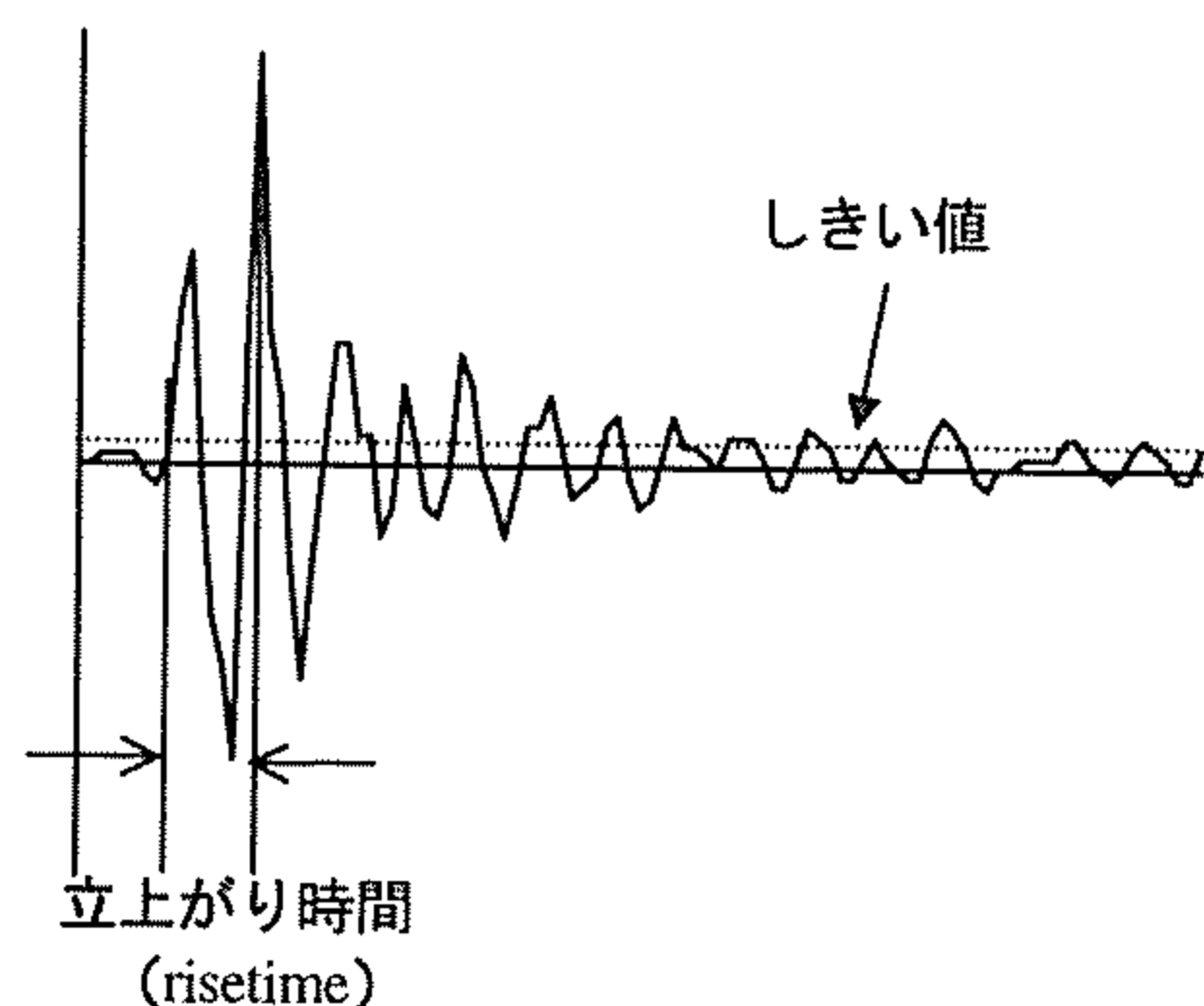


図-15 受振波形の一例

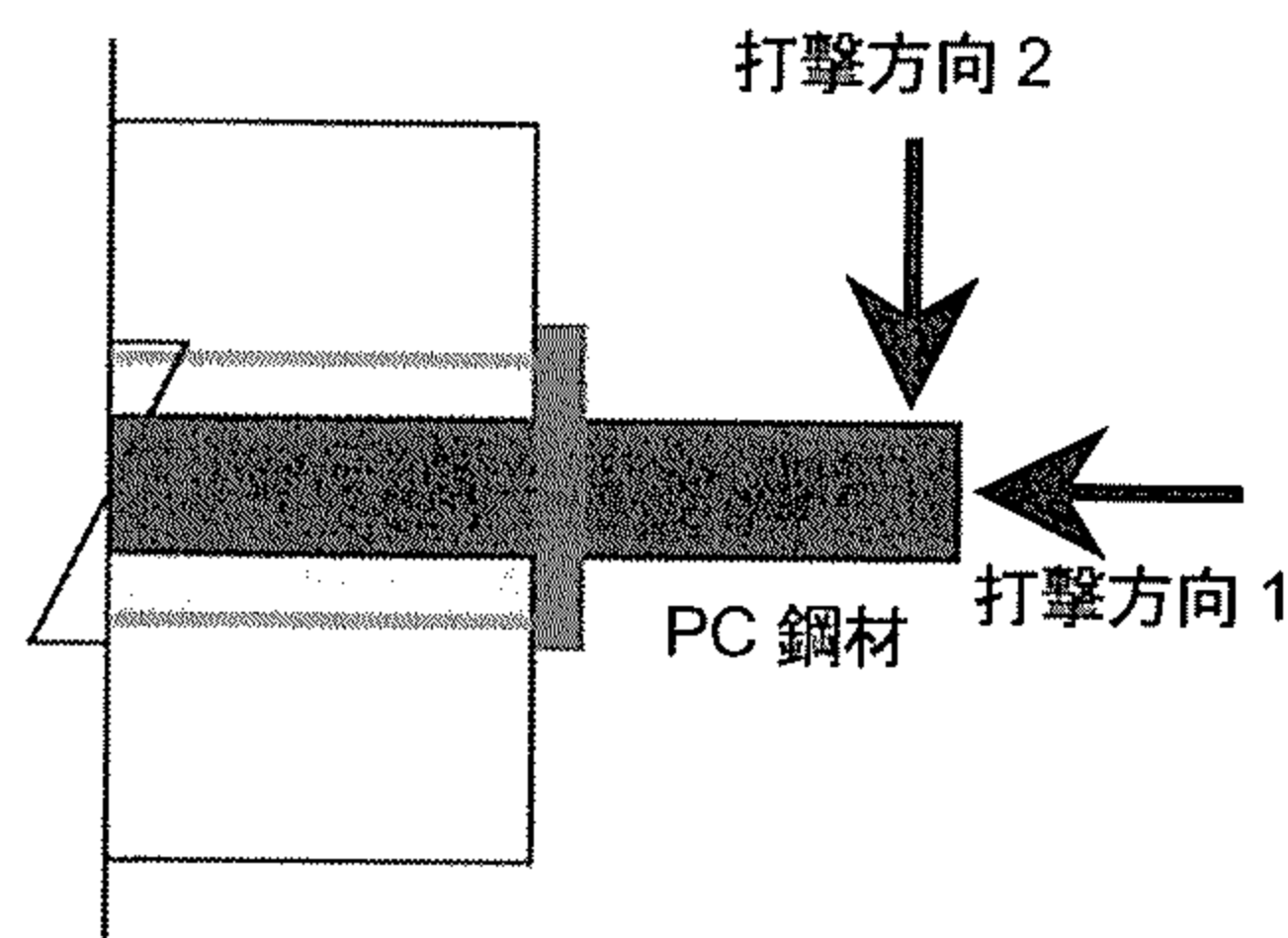


図-16 PC鋼材の打撃方向

しきい値を超えてから最大値に至るまでの時間として定義した。

一方、波形そのものを記録し、その周波数特性を把握するため、別途、加速度計(周波数範囲:0.01~45kHz)を用いた計測も実施した。加速度計の貼付位置は、PC鋼材端部とした。受振された波形はアンプを介し、A/D変換器を通してパソコン上に記録した。その後、FFTにより周波数分布を求めた。なお、打撃は1つのケースについて10回行った。

周波数分布の評価では、打撃は図-16に示すように、PC鋼材の軸方向およびその垂直方向の2パターンについて行った。この理由としては、PC鋼材端部を軸方向に打撃する(打撃方向1)ことによって鋼材中に縦振動が生じる場合と、PC鋼材軸方向に対して垂直に打撃(打撃方向2)することによって横振動が生じる場合の両方に対するグラウトの影響の違いを明らかにする

ためである。これらが明らかとなれば、グラウトの存在による影響を評価しやすい弾性波入力方法の検討に役立つものと考えられる。

(3) 弾性波伝播速度

a) 構成材料の違いが伝播速度に与える影響

図-17に、鋼棒、ストランド両シリーズでの10回打撃における伝播速度を、グラウト充填度0%、50%および100%に分類して示す。これによると、グラウトの有無にかかわらず、両シリーズ共に全体的に伝播速度のばらつきは小さいことが確認できる。シリーズ間で比較すると、ストランドシリーズにおけるばらつきが鋼棒シリーズに比べて若干大きい。これは、構成材料の特性の違いによるものと考えられる。すなわち、鋼棒の場合は、断面積が全長にわたり一定な連続体と考えられるため、入力された弾性波は軸方向にほぼ一様に伝播するものと考えられる。これに対してストランドの場合は、鋼線をよりあわせたものであり、断面の状態が鋼棒と比較すると全長にわたって均一であるとは言い難い。したがって、同じ方法で弾性波を入力したとしても、伝播経路上の断面の不均一性の影響を受けるため、結果として伝播速度にばらつきが生じたものと考えられる。

図-18に、グラウト充填率と伝播速度の関係を充填側打撃および未充填側打撃のそれぞれについて鋼棒、ストランド両シリーズについて示す。なお、ここに示す伝播速度は10回打撃における平均値である。これによると、両シリーズ共にグラウト充填率が増加するに従って伝播速度が低下することが確認された。これはスラブ供試体(その1)での実験結果と一致しており、構成部材の組み合わせにかかわらず本手法を用いることの有効性が示された。また、ストランドシリーズにおけるグラウト充填率の増加に伴う伝播速度の低下の割合は、鋼棒シリーズよりも顕著である。これは、ストランドでは、鋼棒よりも表面積が大きいいため、グラウトにより拘束される面積が相対的に大きくなったためと考えられる。

b) 充填形態の違いが伝播速度に与える影響

グラウト充填率が同じで充填形態の異なるケース(図-18中のグラウト充填度:50とh50の比較)での伝播速度は、構成材料の違いによらずほぼ同じ値を示しており、充填形態の違いによる伝播速度の明らかな変化は見られていない。また、部分充填(図-18中のグラウト充填度:p30)においても同様の傾向がうかがえる。これらより、本実験の範囲内においては、伝播速度は、シース管内部の全体積に対するグラウト部分の占める割合による影響が大きく、充填の形態にはほとんど左右されないものと考えられる。

c) 入力箇所の違いが伝播速度に与える影響

弾性波の入力箇所に着目すると、いずれのケースにおいてもグラウト未充填側打撃において得られた伝播速度(図-18中の△)の方が充填側打撃により得られた伝播速度(図-18中の●)に比べて若干速い。これは、

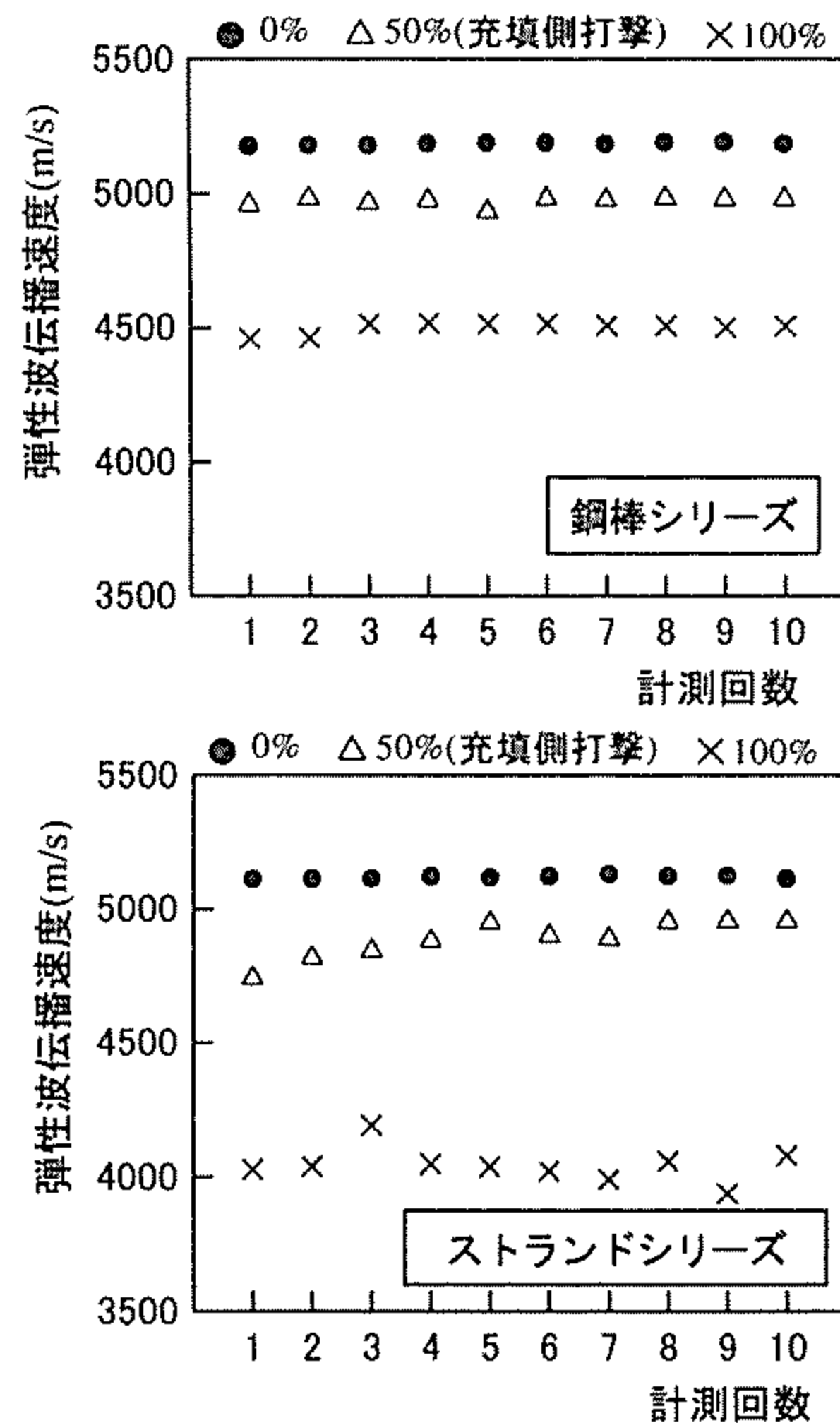


図-17 伝播速度のばらつき

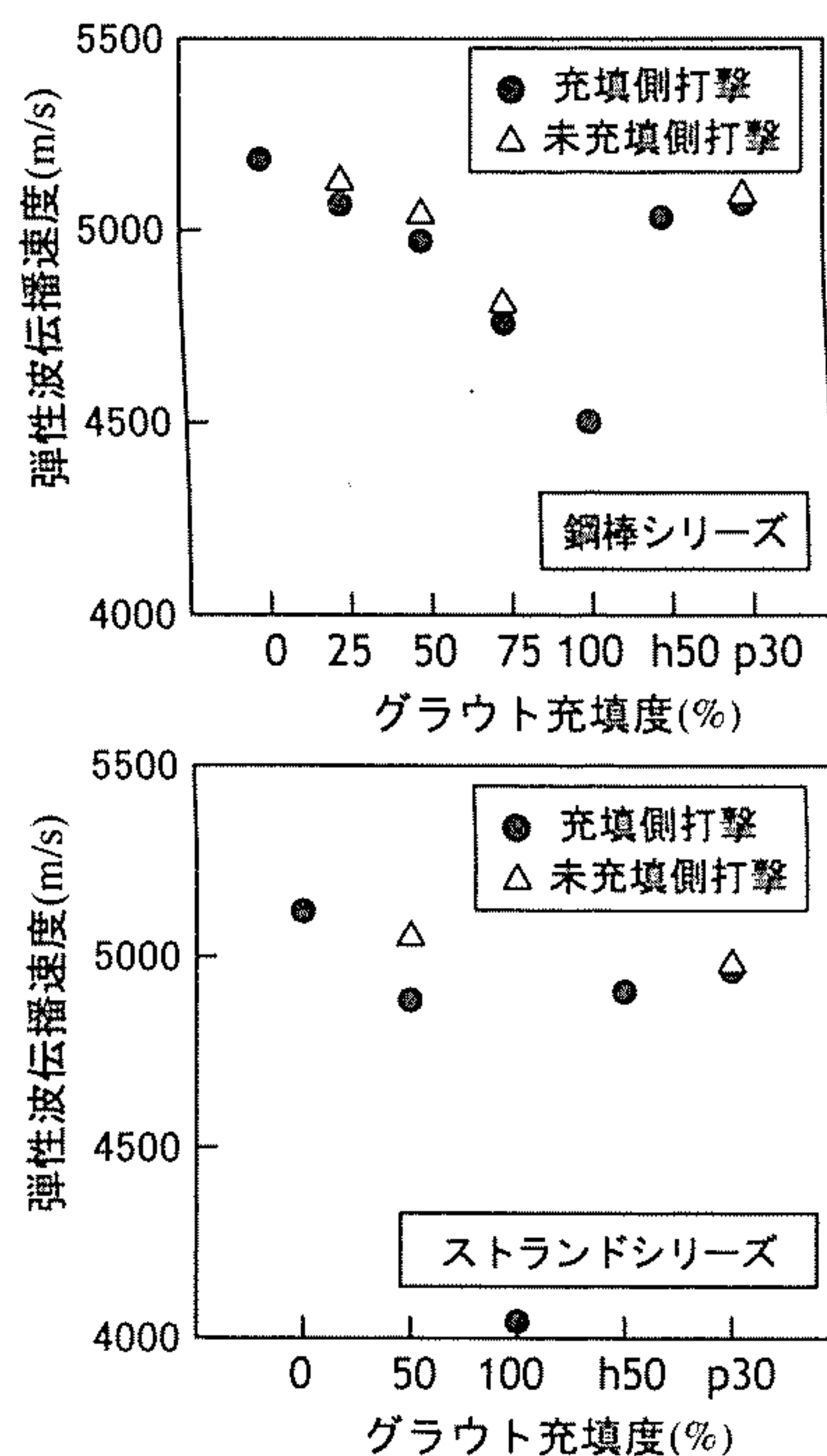


図-18 グラウト充填度 - 伝播速度の関係

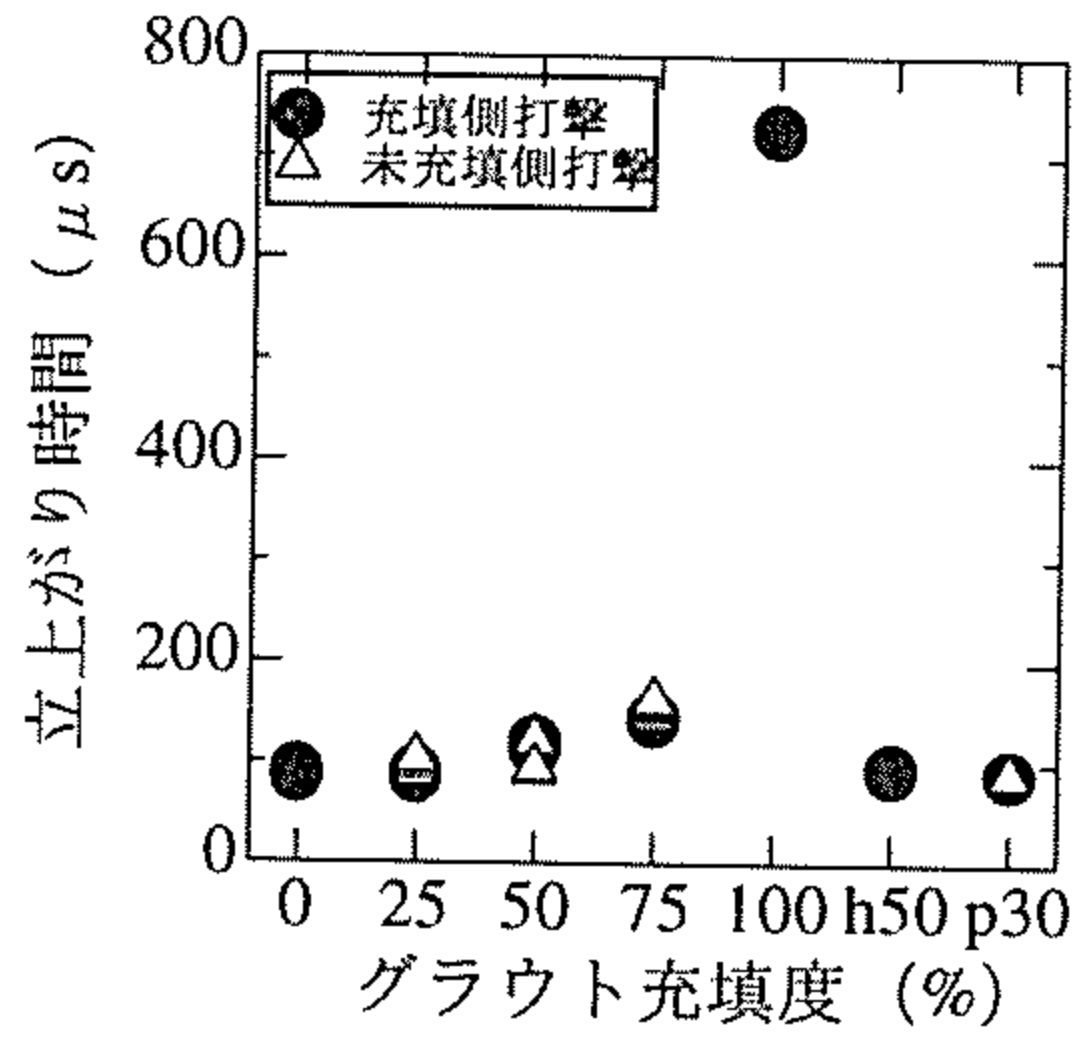


図-19 立上がり時間 (鋼棒シリーズ)

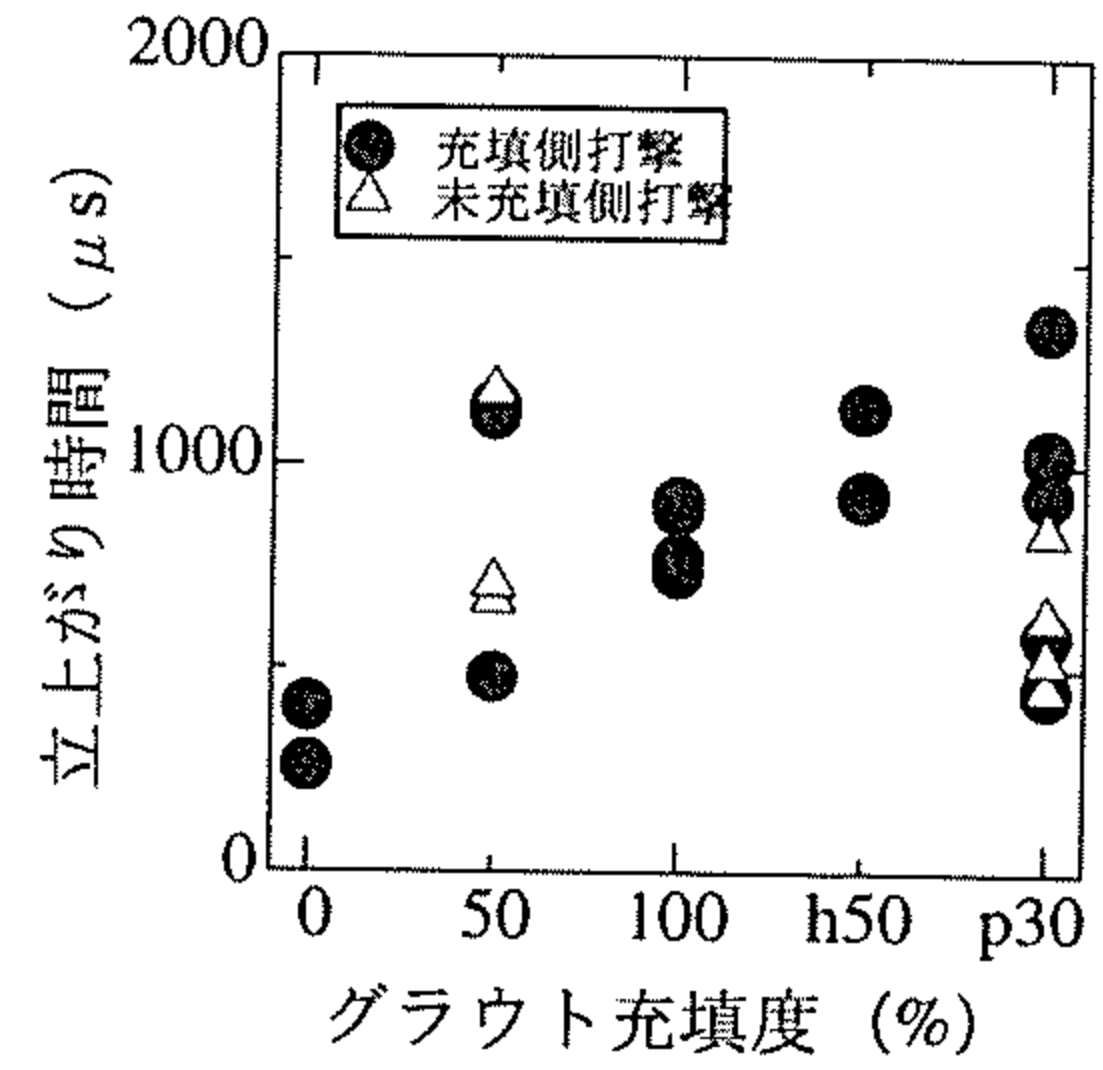


図-20 立上がり時間 (ストランドシリーズ)

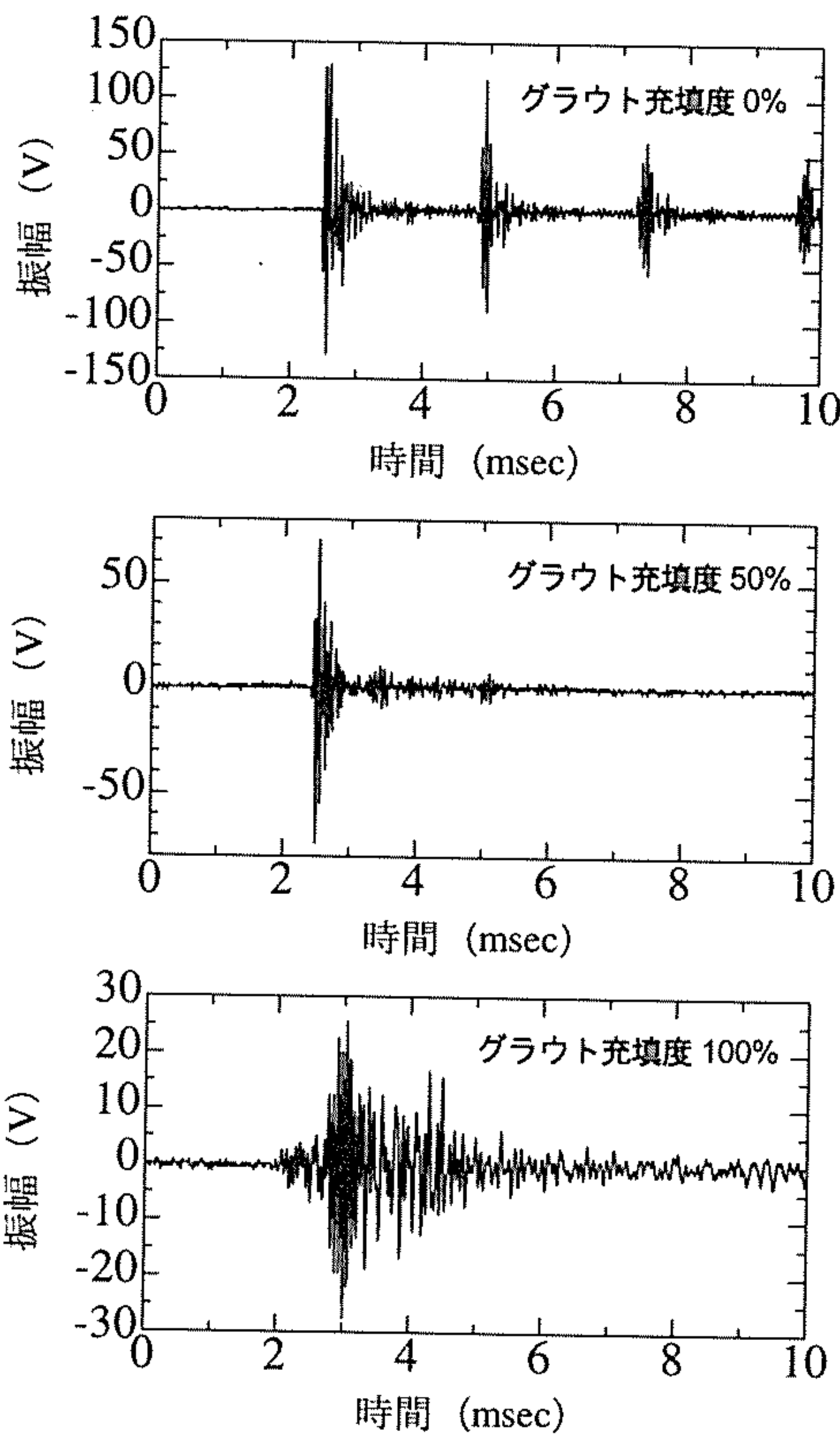


図-21 受振波形 (鋼棒シリーズ)

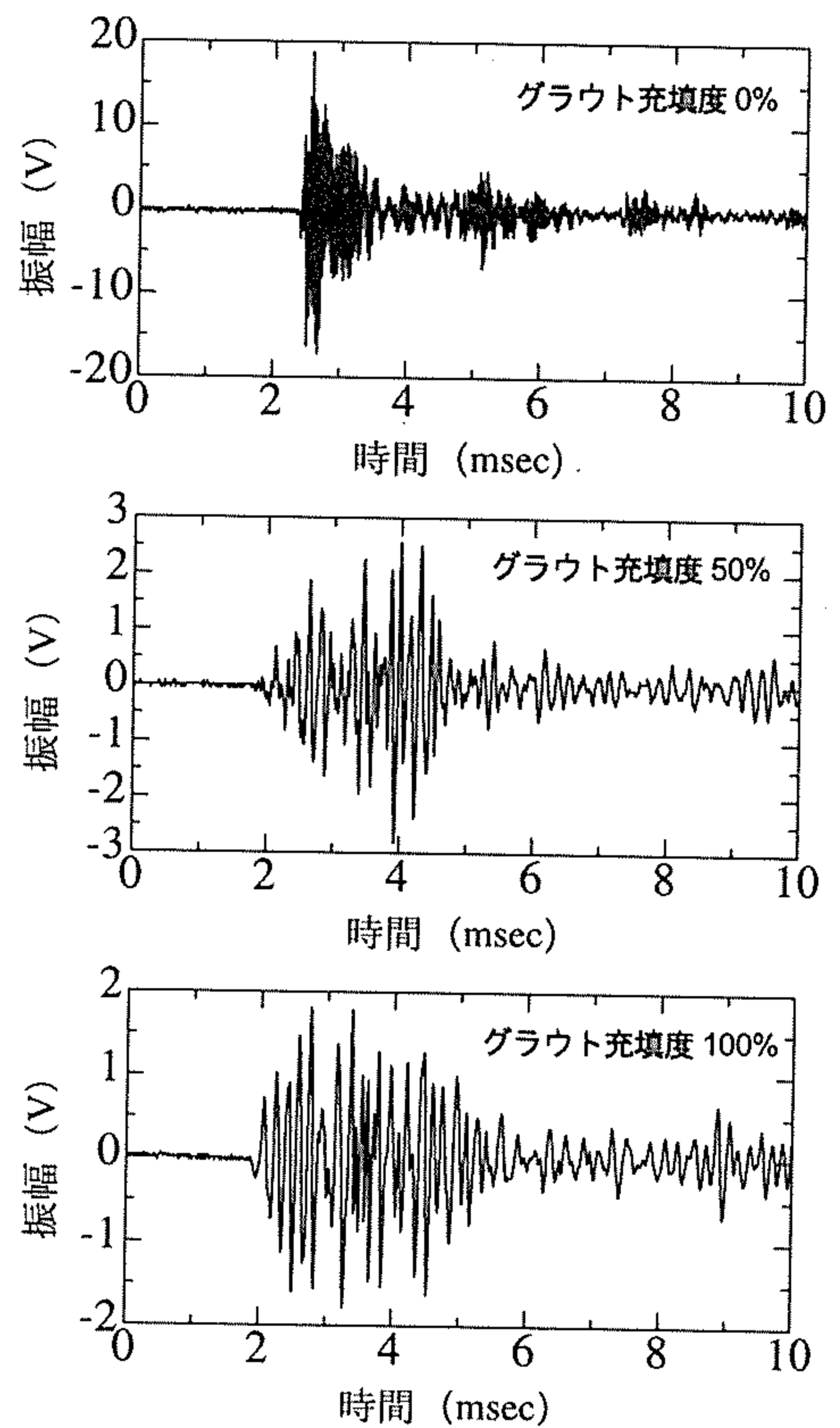


図-22 受振波形 (ストランドシリーズ)

未充填側からの打撃の場合は、入力された弾性波が、まず鋼棒単体を伝播し、その後グラウトの拘束による影響を受けるのに対して、充填側から打撃した際の弾性波は、入力直後よりグラウトの影響を受けることによるものと考えられるが、この機構については、さらに詳細に検討する必要がある。しかしながら、その差は小さく、また、入力箇所によらずグラウト充填率が増加するに従って伝播速度が低下する傾向は同じであ

ることから、本研究で示した実験条件下では、入力箇所の違いが本手法に与える影響は少ないと考えられる。

(4) 立上がり時間

a) 鋼棒シリーズ

図-19に、鋼棒シリーズにおけるグラウト充填度と立上がり時間の関係を示す。この図によると、グラウト充填度が0~75%の間では、立上がり時間の変化は相

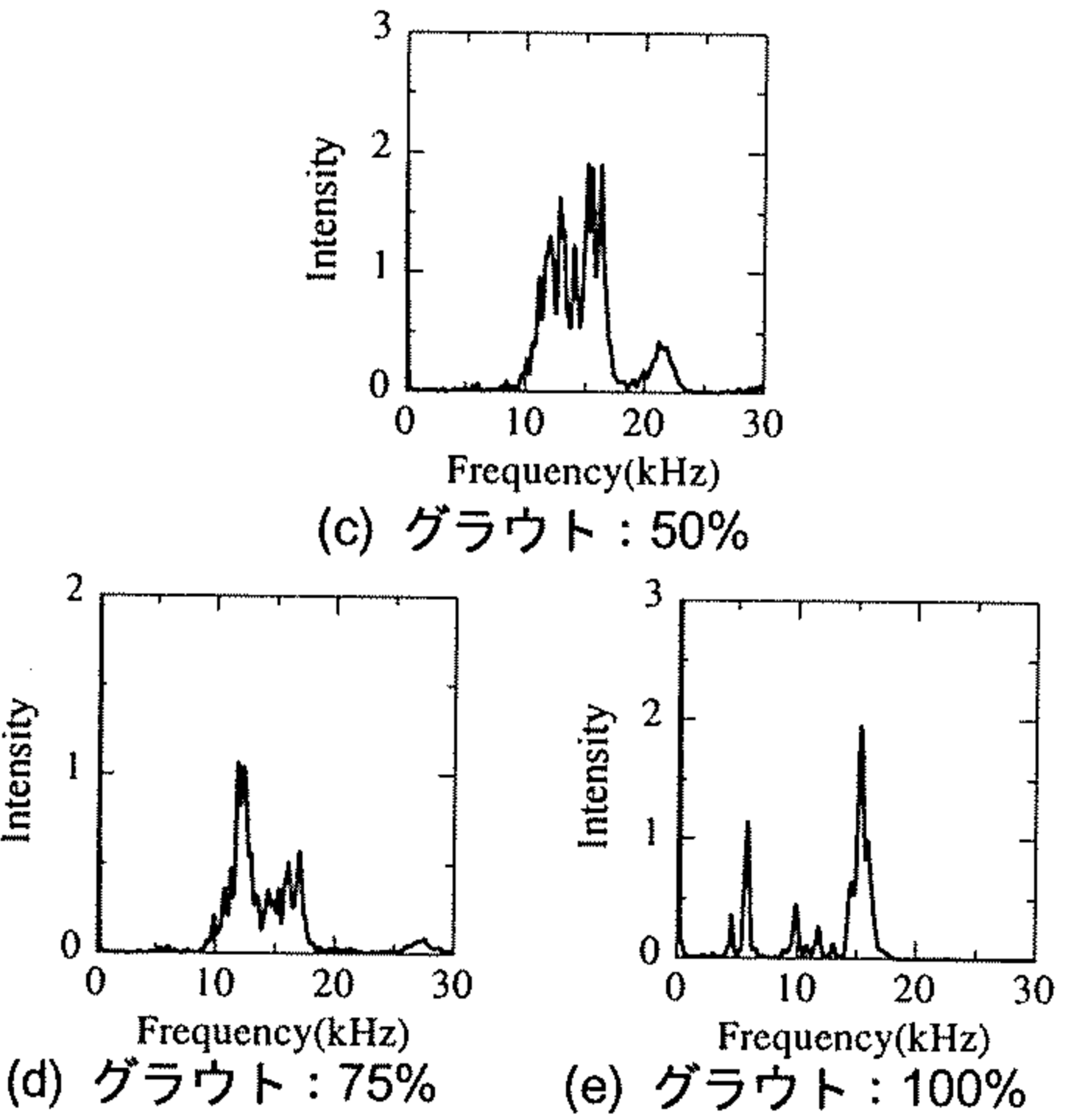
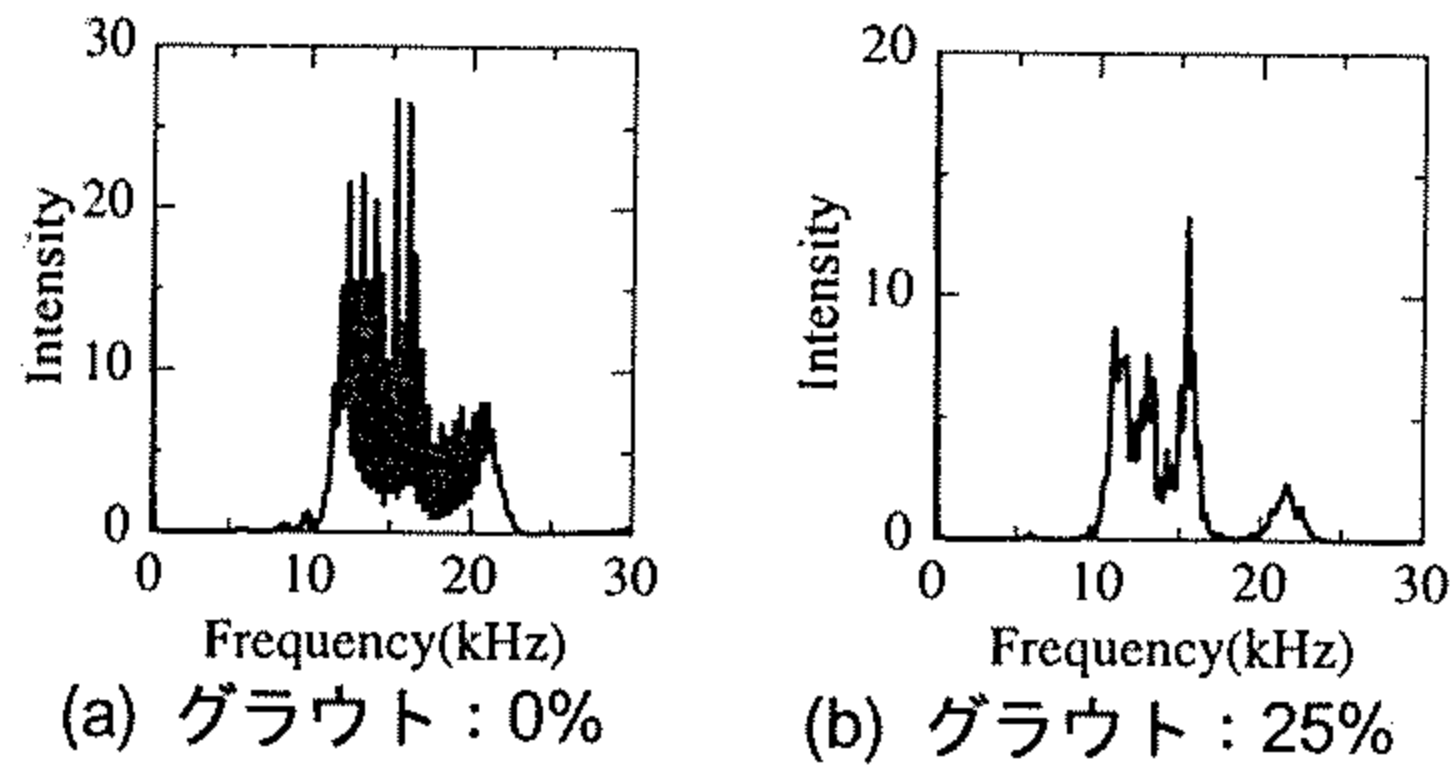


図-23 周波数分布 (鋼棒シリーズ), 打撃方向1

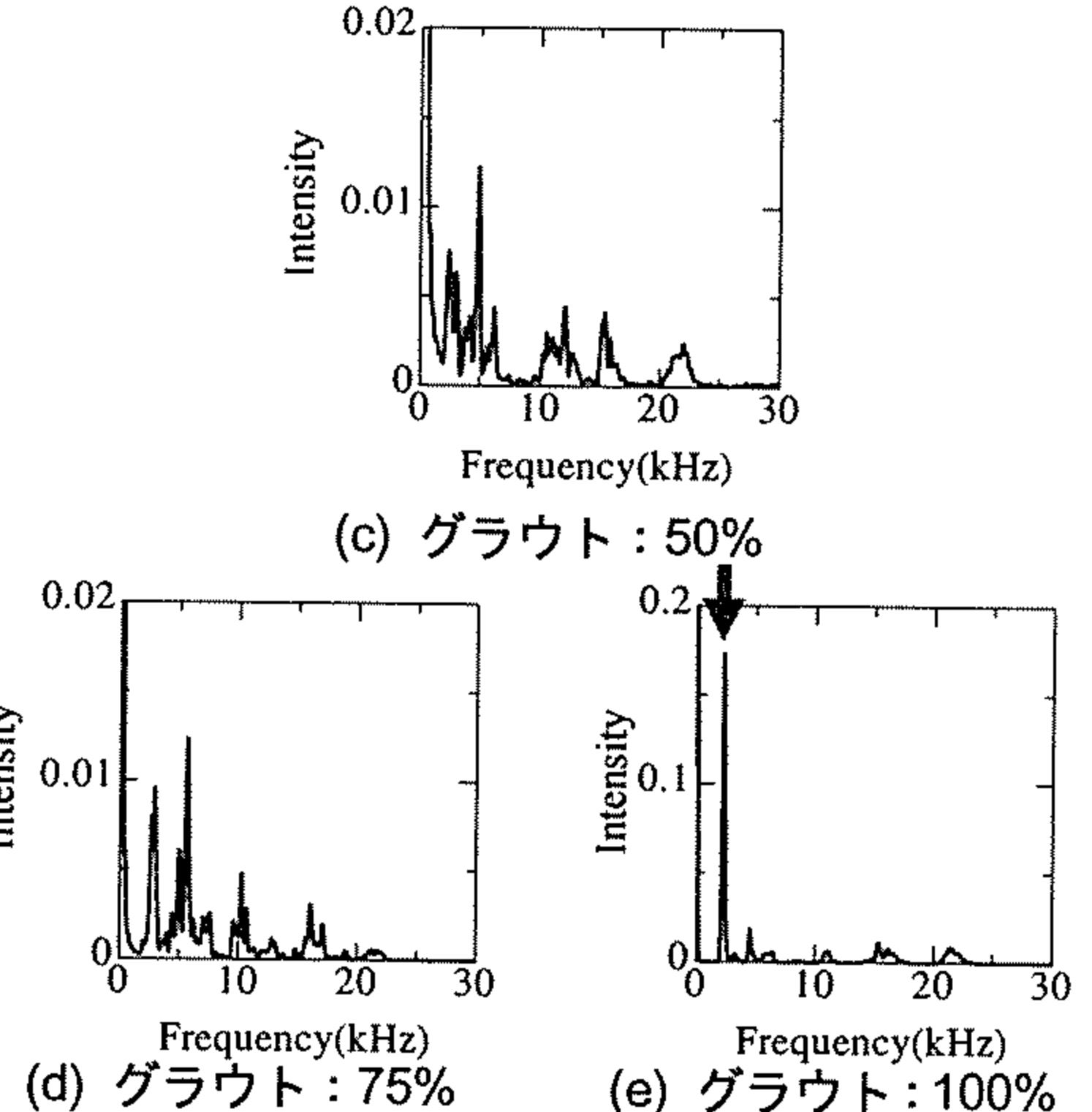
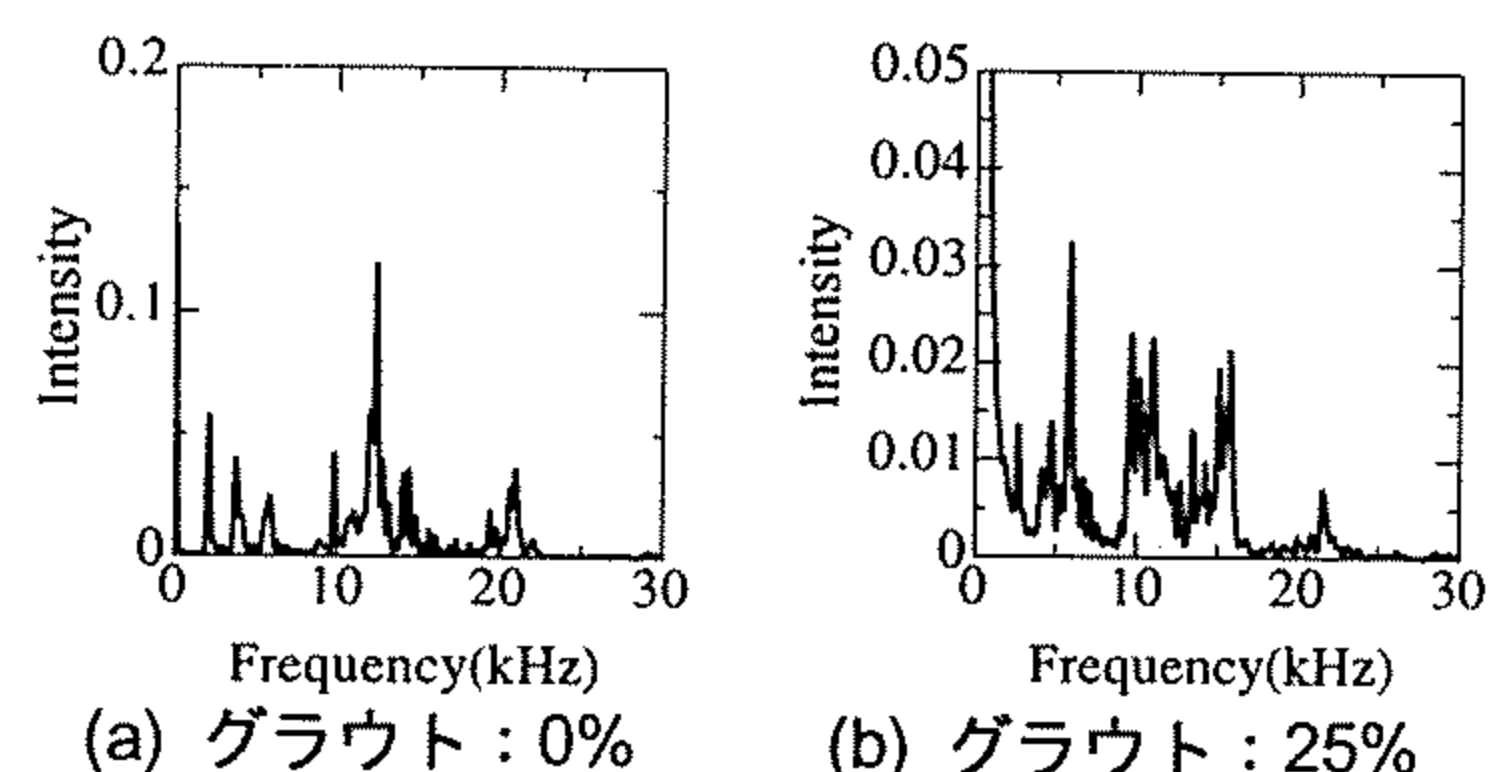


図-24 周波数分布 (鋼棒シリーズ), 打撃方向2

対的に小さい。さらに断面積の半分が全長にわたって充填されているh50、軸方向のある区間のみが全断面積充填されているp30でも立上がり時間には大きな変化は見られなかった。これに対してグラウト充填度100%の場合は、他と比較して非常に大きな値を示している。これは、図-18で示した弾性波伝播速度とは異なる傾向である。これらより、弾性波伝播速度はグラウト充填度（空隙率）とともに徐々に変化するパラメータであるが、立上がり時間は空隙の有無をより明瞭に区別できるパラメータであると考えられる。

b) スtrandシリーズ

図-20に、strandシリーズの立上がり時間とグラウト充填度との関係を示す。これによれば、グラウトが充填されている場合は、グラウト充填度0%に比べて、立上がり時間が大きくなっているが、鋼棒シリーズとは全く異なった傾向を示した。また、全体的なばらつきも大きくなっていることがわかる。これは、伝播速度の場合と同様、鋼棒とstrandの構造的な違いによるものと考えられる。

この理由を明らかにするために、鋼棒シリーズにおいて計測された波形を図-21に、strandの場合の受振波形を図-22にそれぞれ示す。波形は、既に(2)で示したようにすべてのケースについて10回計測を行った

が、ほぼ同様の結果が得られたため、ここでは代表的なものを示す。

鋼棒シリーズの場合、グラウト充填度が大きいほど、波形の最大振幅値が減少しており、グラウトの存在による弾性波の減衰の影響が伺える。0%と50%の場合を比較すると、0%ではグラウトによる減衰の影響がないため、2次あるいは3次の反射波が確認されているのに対して、50%では反射波の存在は認められない。しかしながら、いずれも第1波目の波形の形状は似ており、100%の場合と比べると立上がりは非常に鋭く（立上がり時間が短く）なっている。このように、鋼棒シリーズでは、全長の半分程度をグラウトにより拘束されても、これによる波形の変化は小さいが、全長にわたってグラウト充填された場合に、波形が著しく変形されることにより、立上がり時間が大きく変化するということがわかった。

一方、strandシリーズの波形は鋼棒シリーズのものとはかなり異なった形状を示した。strandシリーズでは、0%の場合においても、strandの構造的な複雑さから、入力した弾性波が断面内を一様には伝播せず、strand内部での減衰の影響を受けていることがわかる。また、グラウト50%および100%では、入力された波形はすでに大きな変形を受けており、最大振幅値を与える時間を判別すること、すなわち立上がり時間を

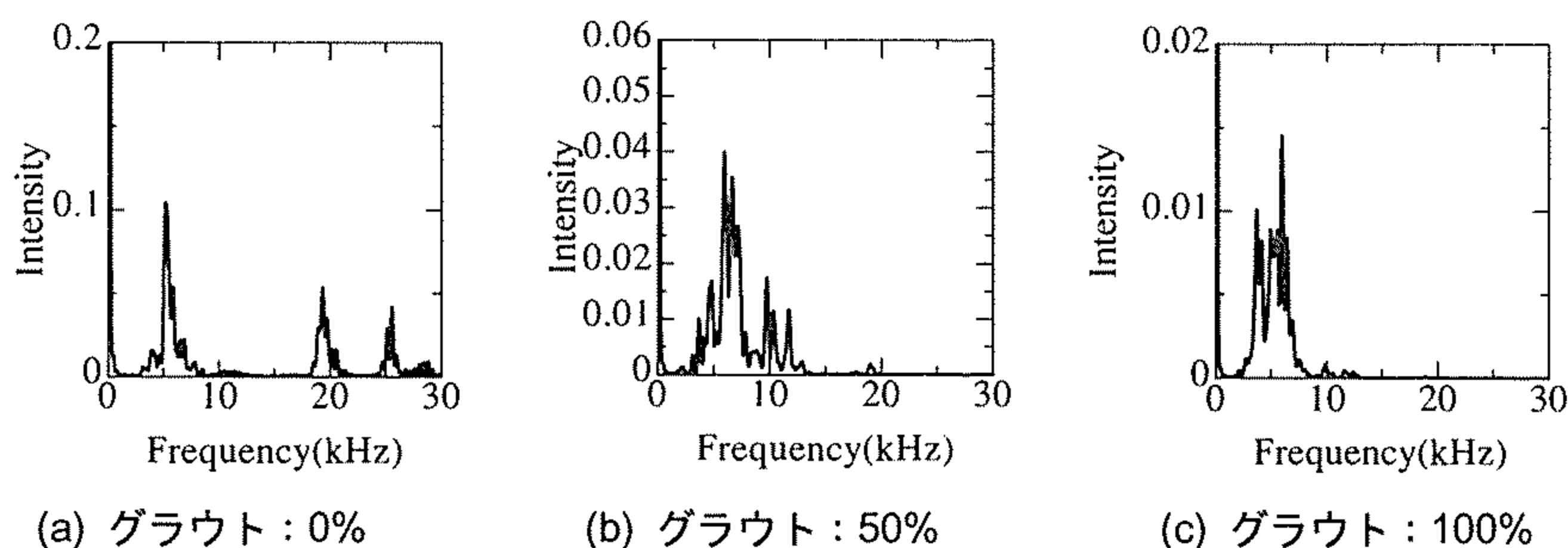


図-25 周波数分布 (ストランドシリーズ), 打撃方向1

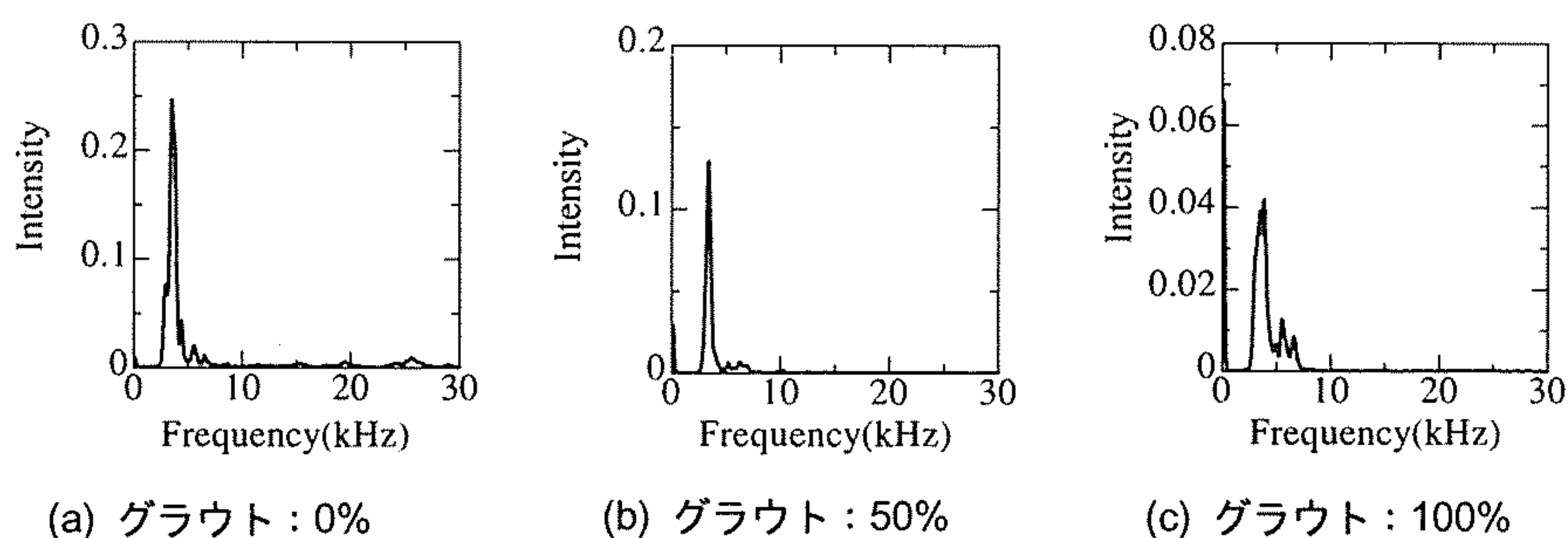


図-26 周波数分布 (ストランドシリーズ), 打撃方向2

決定することも場合によっては容易ではなくなっている。

これらより、ストランドを使用した場合については、評価パラメータとしての立上がり時間の適用は困難となるケースもあり得ると考えられる。

(5) 周波数分布

実験で得られた周波数分布は、グラウト充填側打撃と未充填側打撃とではほぼ同様の傾向であったため、ここでは充填側打撃の結果のみを示す。周波数分布も波形同様 10 回のデータにおいて各測定間に違いはなかったため、代表的なものを示す。

a) 鋼棒シリーズ

鋼棒シリーズにおいて、打撃方向1で得られた周波数分布を図-23に示す。これらの図によれば、グラウト充填度が0~50%の間では、グラウト充填度が大きいほどスペクトル強さが全体的に小さくなるものの、いずれの場合でも分布形状は似ており、12kHz付近、16kHz付近および22kHz付近にピークを有している点で共通していることがわかる。これより、これらのケースにおいては、グラウトの存在による波形の変形が比較的小さいと考えられる。この理由は、図-21の考察で示したとおりである。これに対して75%の場合では、16kHz付近のピークに比べ12kHz付近のピークがより卓越した形状となっている。さらに100%の場合では、0~75%の場合には見られなかった6kHz付近に新たな

ピークが出現している。

以上の結果より、打撃方向1では、周波数分布による評価ではグラウトが完全に充填されていれば完全未充填あるいは部分的に充填されている場合と区別できる可能性はあるものの、いわゆる充填の程度を評価するパラメータとしては、立上がり時間と同じく感度が低いと考えられる。

次に、打撃方向2の場合において得られた周波数分布を図-24に示す。打撃方向1では、基本的にはピーク位置には大きな変化はみられなかったのに対し、打撃方向2では、グラウト充填度が大きくなるにしたがって高周波成分の割合が徐々に減少しているのがわかる。これは、打撃方向2では、打撃方向1と比較すると波動の進行方向に対する垂直方向の変位成分が大きいため、グラウトの存在による鋼材の拘束効果がより大きく現れとことによるものと考えられる。

本実験の範囲内では、打撃方向2では、図-24(e)中に矢印で示す低周波の単峰のピークの存在によりグラウト100%の場合を判別できるだけでなく、グラウト充填度の違いをある程度定性的に把握できる可能性を有していることが明らかとなった。

b) ストランドシリーズ

図-25に打撃方向1の場合の周波数分布を示す。この図によれば、グラウトが存在することによって、周波数分布における高周波領域の成分が減少していること

がわかる。グラウト充填度100%の場合では、50%に比べてより低周波領域に存在するピーク成分が相対的に大きくなっている。このように、それぞれのデータの相対比較により、グラウト充填度の大小比較はできそうであるが、周波数分布とグラウト充填度との定量的な関係を見いだすのは現時点では難しいと考えられる。

図-26に、打撃方向2における周波数分布を示す。この図によれば、グラウト充填度によらず3.5kHz付近に共通したピークがみられる。また、周波数分布の形状自体もほとんど変化していない。これは、本実験における打撃条件では、グラウト充填度0%の場合からわかるように、弾性波がストランド内部を伝播する過程で、すでに高周波成分が減衰してしまっているため、周囲のグラウトによる拘束の影響は見かけ上小さくなったものと考えられる。このため、グラウト充填度が大きくなっても、鋼棒の場合のように、低周波側へのスペクトルピークのシフトがみられず、結果的に周波数分布形状がほとんど変化しないものと考えられる。

以上の結果より、ストランドシリーズでは、打撃方向1の場合は、周波数分布によりグラウト充填度の評価がある程度可能であるが、打撃方向2の場合は周波数分布をグラウト充填評価へ適用するのは困難であると考えられる。

5. 実物PCタンクへの適用

4章までの検討の結果、グラウト充填評価における弾性波伝播速度、立上がり時間および周波数分布の適用性および感度が明らかとなった。そこで、ここでは実構造物に対する上記パラメータの適用性を確認する目的で、建設中の実物PCタンクを対象とした実験を行った。

(1) 実験概要

a) 実物PCタンク

実験を実施したのは、写真-4に示す建設中のPCタンクである。このタンクは、内径：40m、壁高さ：約10mであり、また貯水容量は10000m³である。このうち、タンクの壁面における鉛直方向PC鋼材を対象として弾性波の計測を行った。PC鋼材としては、PC鋼棒（φ32mm）、シーすとしては、スパイラルシーす（φ42.6mm）が用いられている。鋼棒の長さは9.884m（5m+4.884m）であり、上側先端部から4.884mの位置でカップラーにより連結された構造になっている。なおPC鋼棒の設置間隔は57.3cmである。

b) 弾性波の入力および受振方法

弾性波の入力は、4章で示したものと同様の手法によ

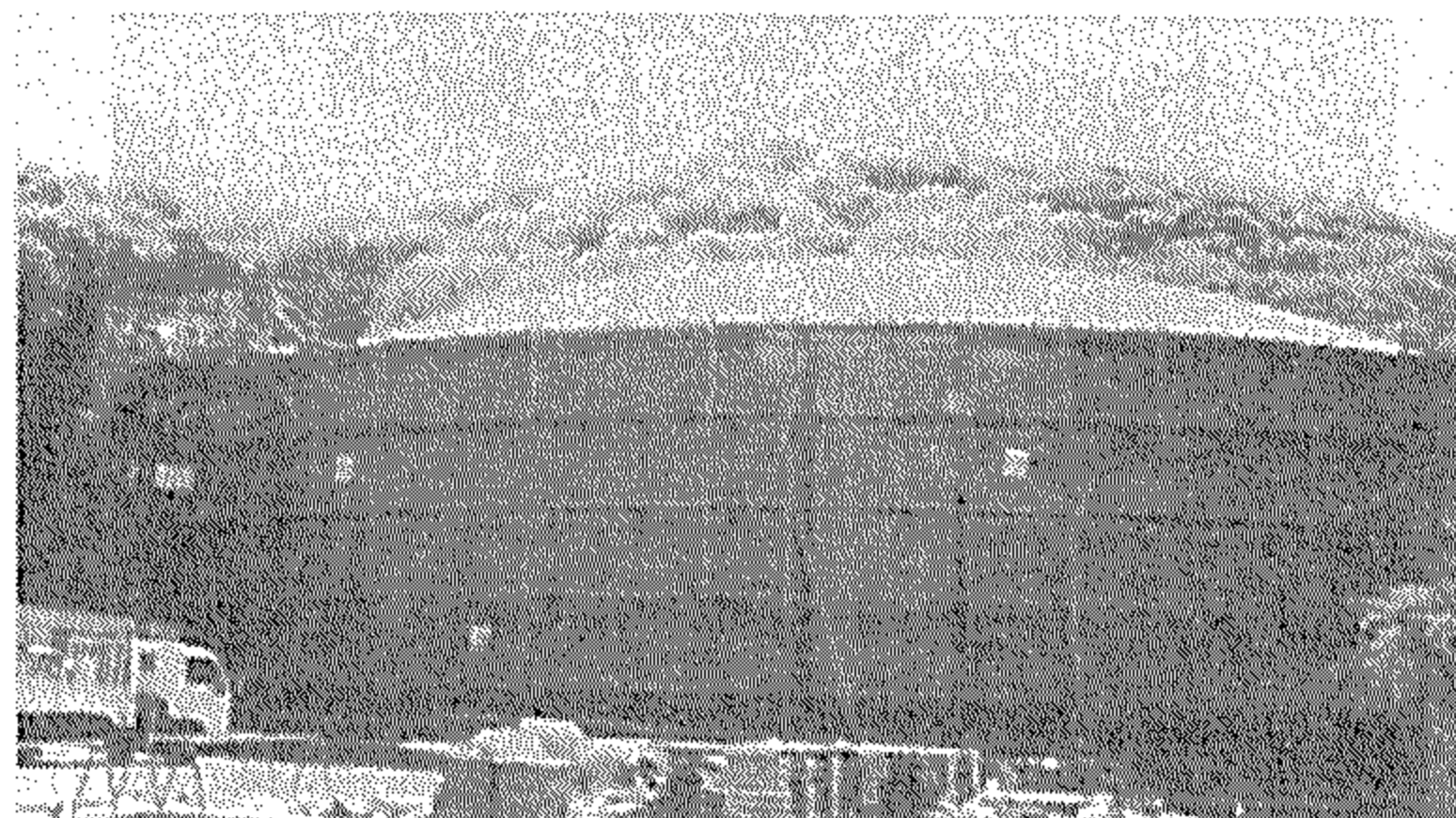


写真-4 建設中のPCタンク

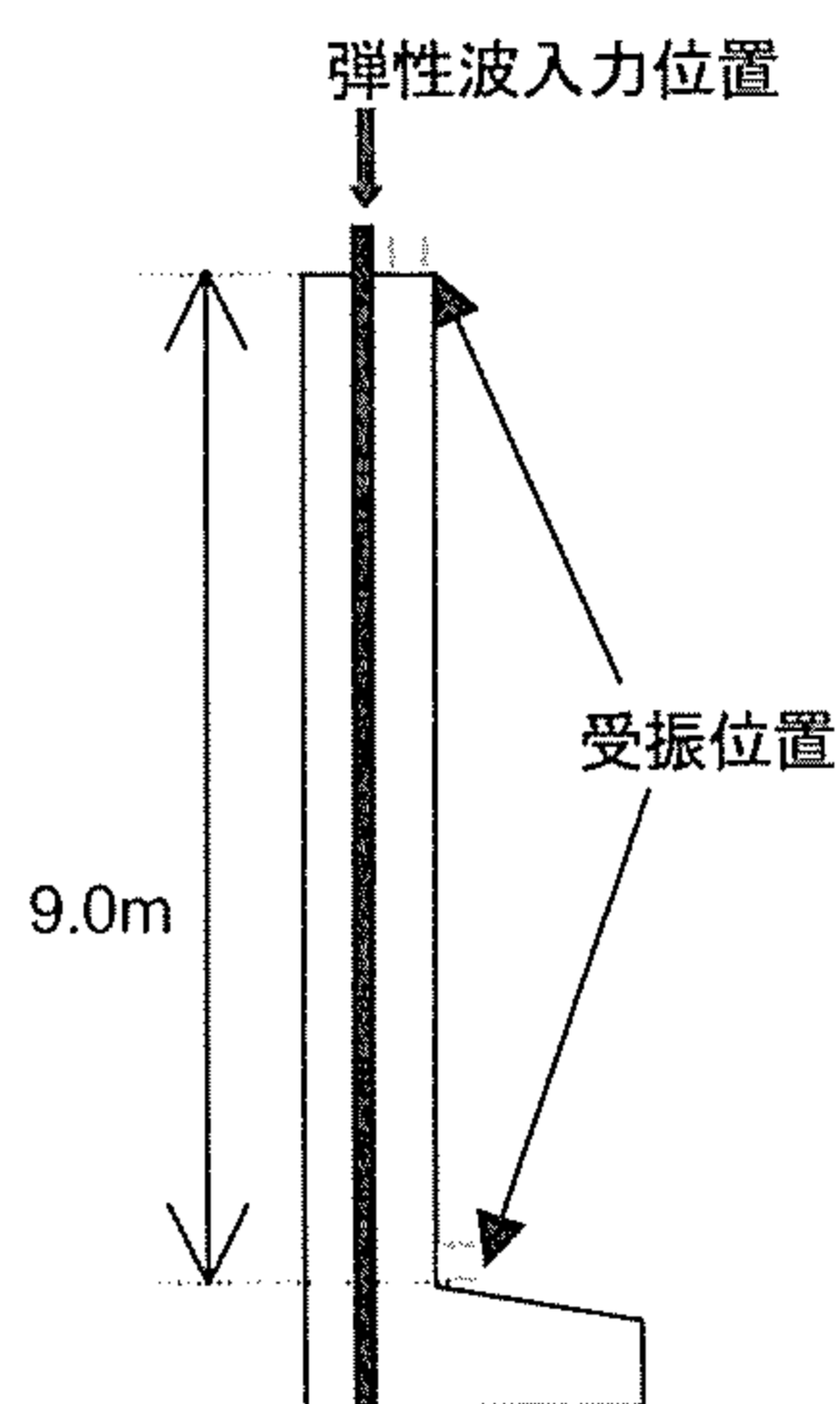


図-27 弾性波の入力および受振位置



写真-5 弾性波入力状況

り行った。弾性波の受振には、同じく4章と同様AEセンサおよび加速度計を用いた。図-27に示すように、弾性波の入力位置はPC鋼棒先端部および保護コンク

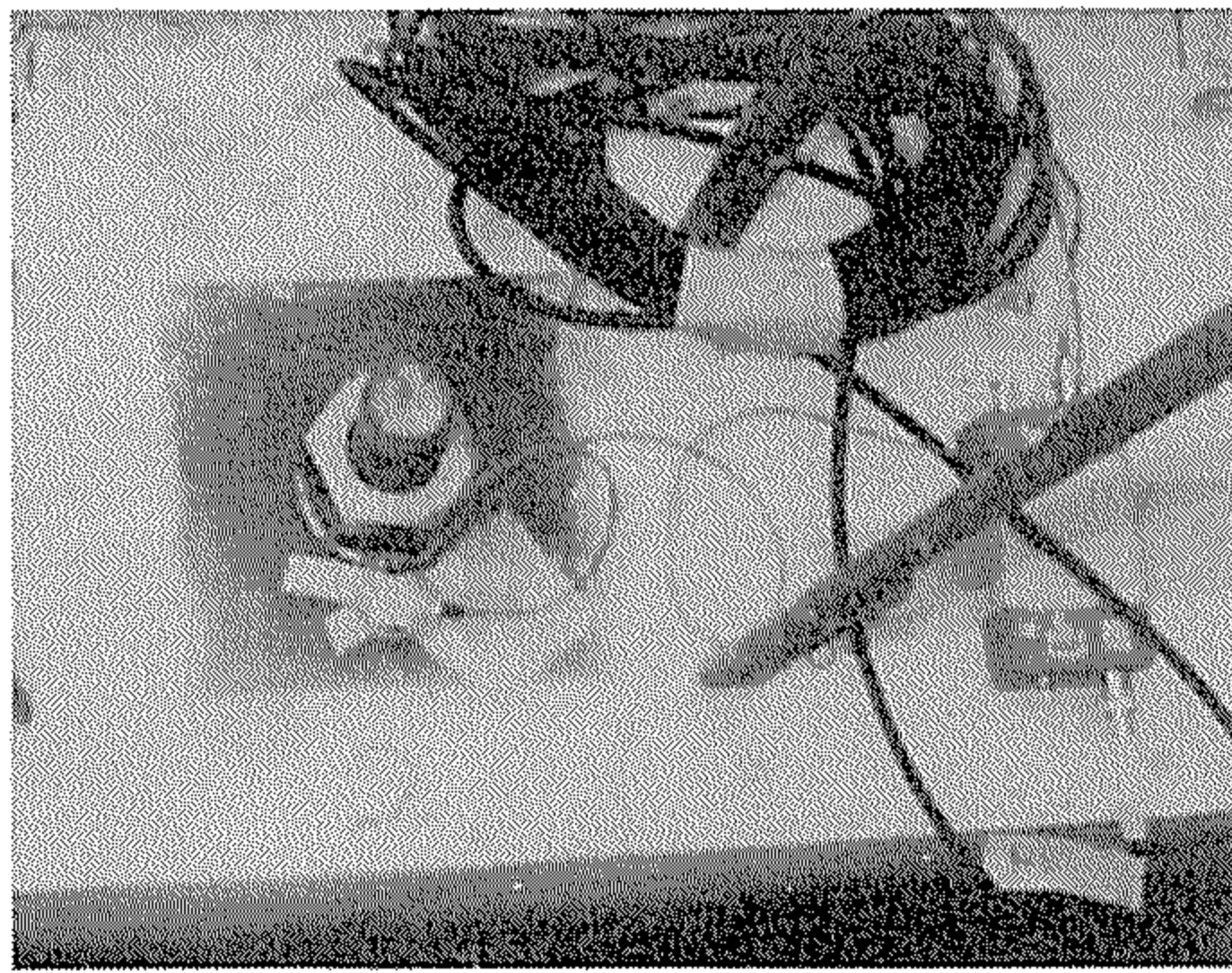


写真-6 AE センサ貼付状況 (打撃部近傍)

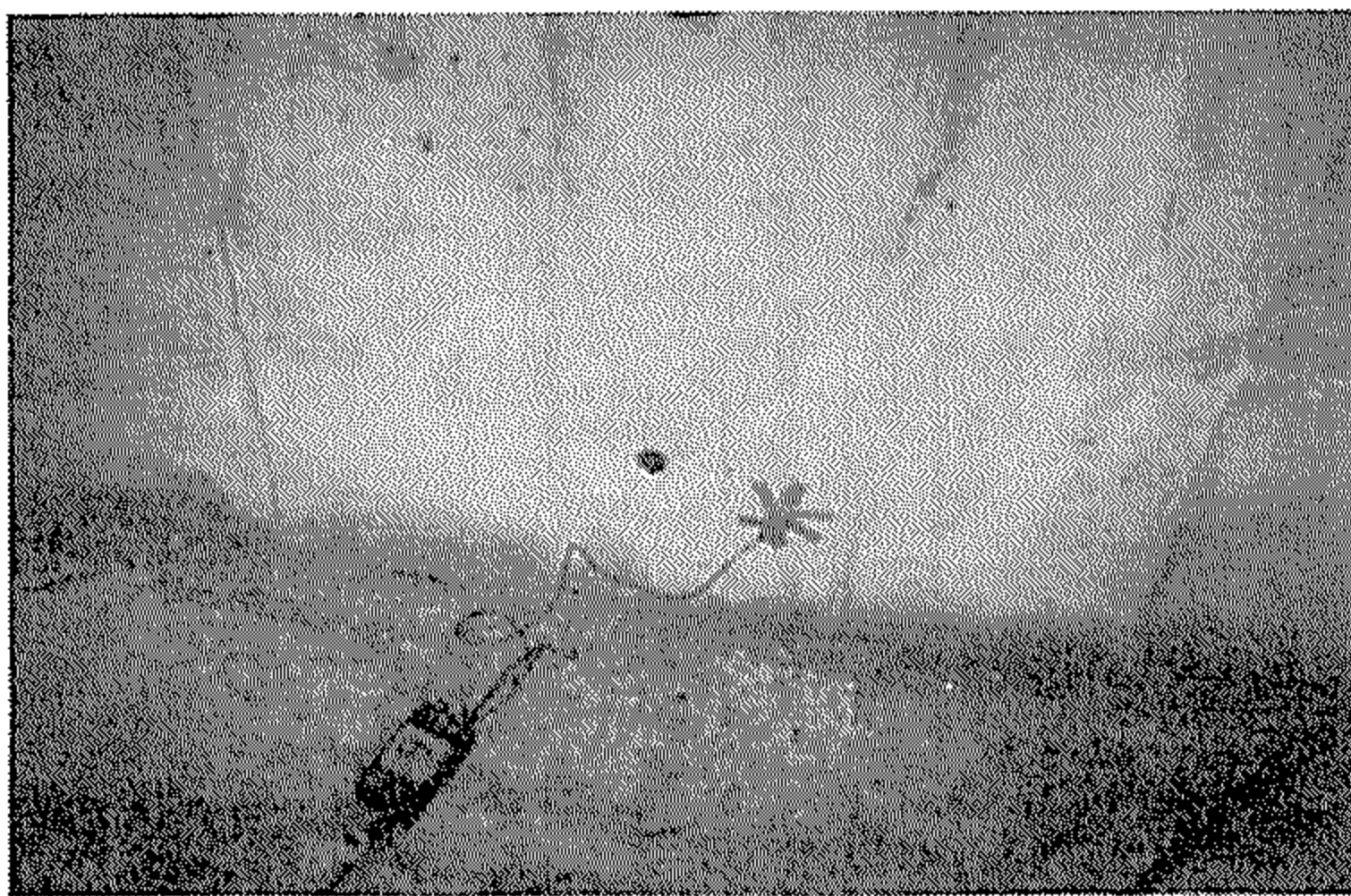


写真-7 AE センサ貼付状況 (壁面下部)

リート打設後はPC鋼棒軸延長線上のコンクリート表面とした。受振位置は、図中に示すように入力位置近傍の定着プレート上部および壁面下部とした。センサ間距離は9mとした。各センサ間における伝播時間を計測し、センサ間距離を用いて弾性波伝播速度を算出した。また、波形そのものも記録し、立上がり時間を求めるとともにFFTにより周波数分布を求めた。

実験を実施したのはグラウト注入前（グラウト充填度0%）、注入後（グラウト充填度100%）および保護コンクリート打設後である。なお対象としたPC鋼棒は、10本である。打撃は各鋼棒について10回行った。

弾性波入力状況およびセンサ貼付状況を写真-5～7にそれぞれ示す。

(2) 実験結果および考察

a) 弾性波伝播速度

図-28に、各PC鋼棒において得られた弾性波伝播速度の結果を示す。グラウト充填後の伝播速度は、グラウト充填前の伝播速度の結果と比較すると、すべてのケースについて約2割程度減少していることがわかる。さらに保護コンクリート打設後は、若干ではあるもののPC鋼棒を打撃した場合と比較すると伝播速度は低下していることがわかる。この結果は2章および4章において示した結果と一致しており、実構造物において

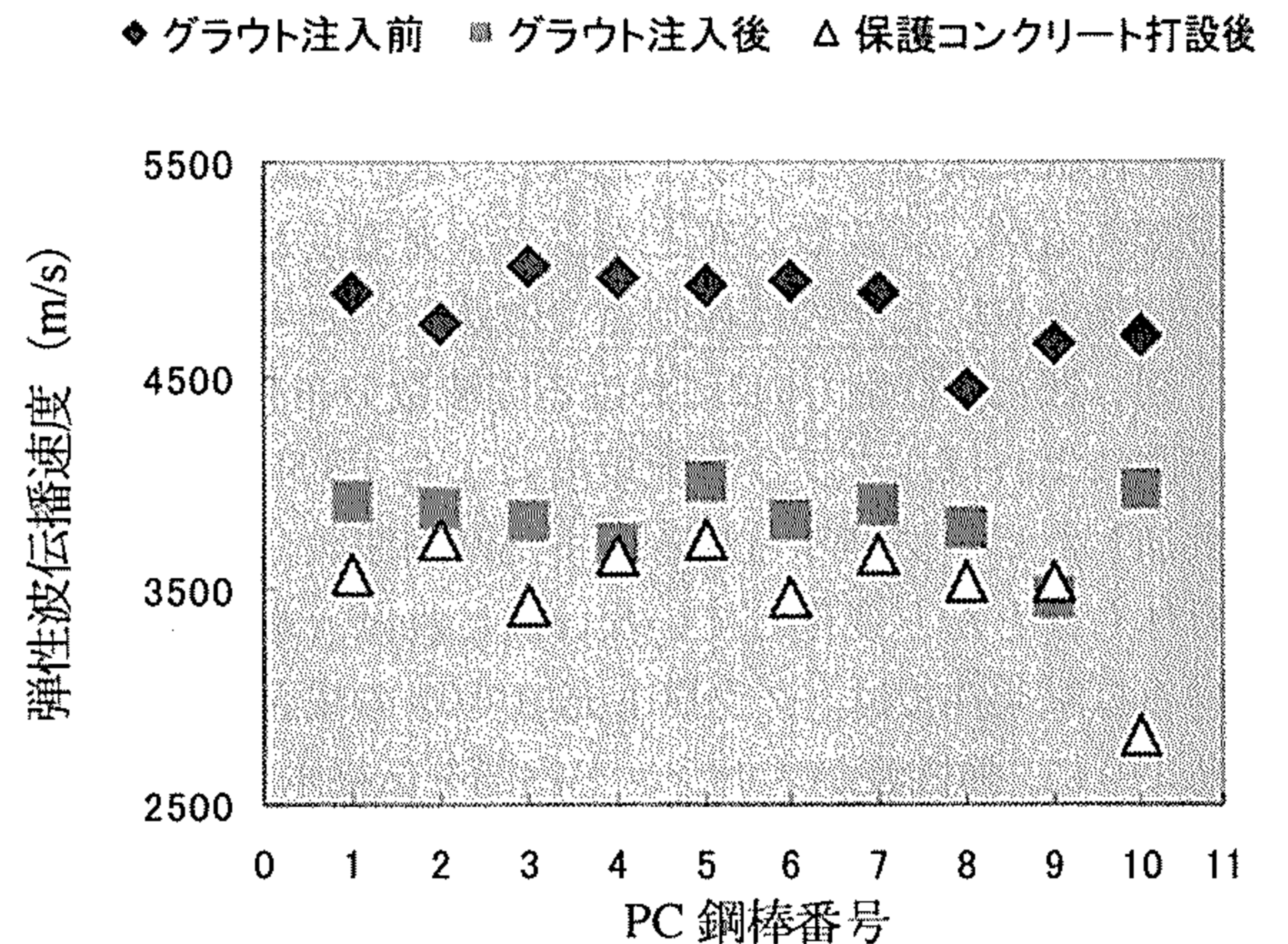


図-28 弾性波伝播速度

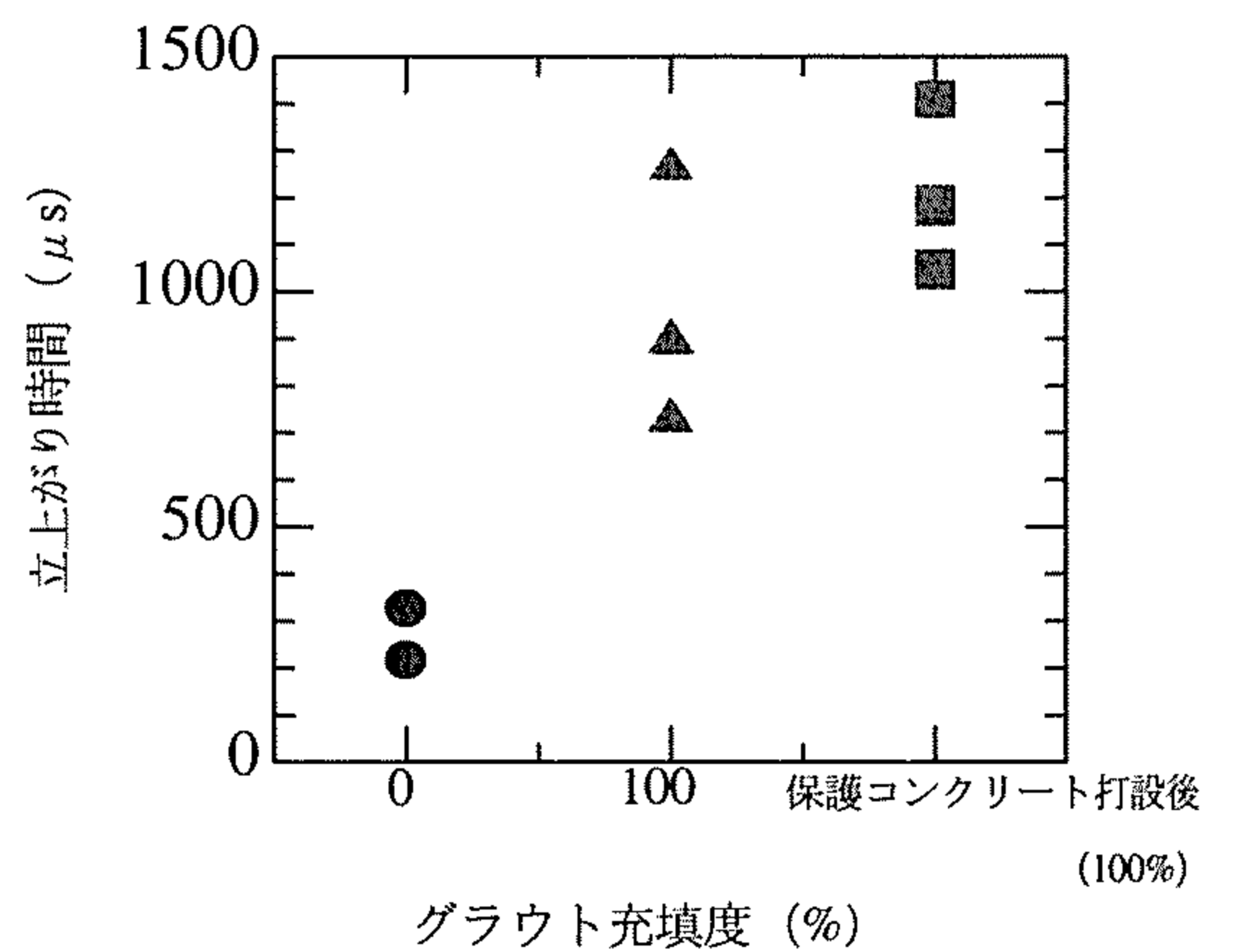


図-29 立上がり時間

もグラウト充填評価には弾性波伝播速度が有効となることが明らかとなった。

b) 立上がり時間

立上がり時間の結果を図-29に示す。これによれば、グラウトが充填されていれば未充填の場合と比較して立上がり時間は大きくなる傾向にあり、保護コンクリート打設後では、これがさらに大きくなる傾向にある。しかしながら、スラブ供試体（その2）実験の結果と比較すると値のばらつきは大きくなっている。これは、弾性波の受振位置がタンク壁面であり、PC鋼棒上で直接受振していなかったこと、および弾性波の伝播距離が9mであり、4章において示したスラブ供試体の長さよりも長かったことによることが考えられる。

特に、入力条件が同じであっても、コンクリート表面で弾性波を受振した場合は、PC鋼棒上での受振に比べて得られる弾性波の減衰が大きくなることが考えられるため、結果として伝播経路上に存在するグラウトの有無の影響が小さくなったことによるものと考えら

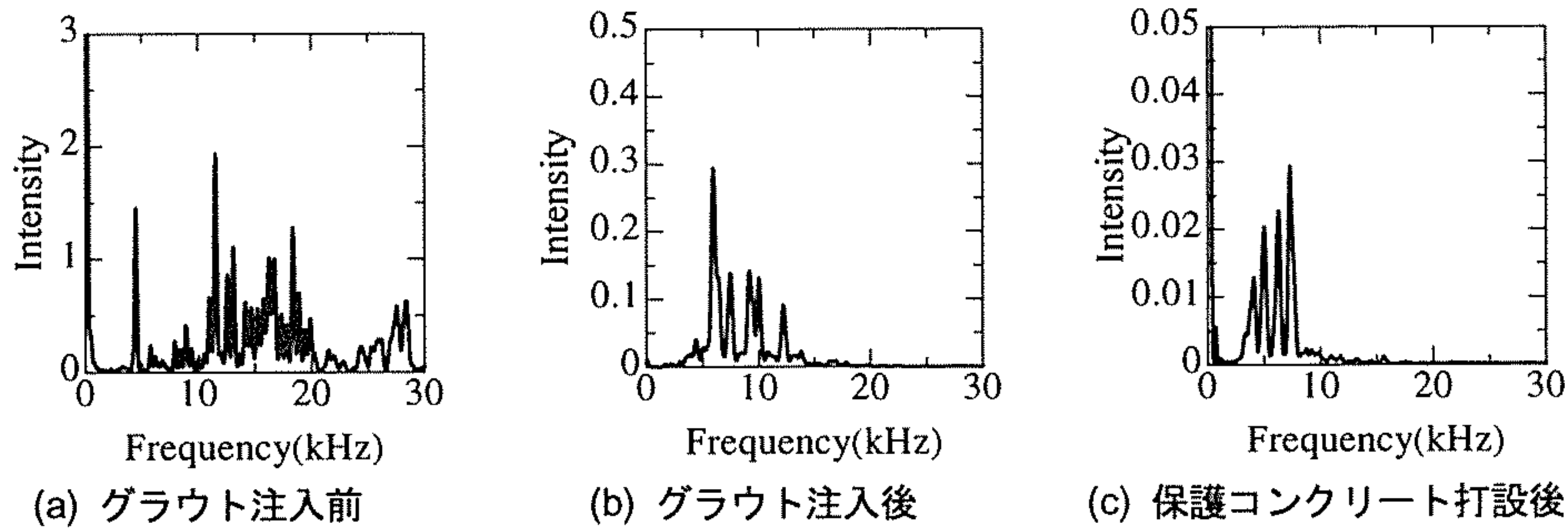


図-30 周波数分布（打撃方向1）

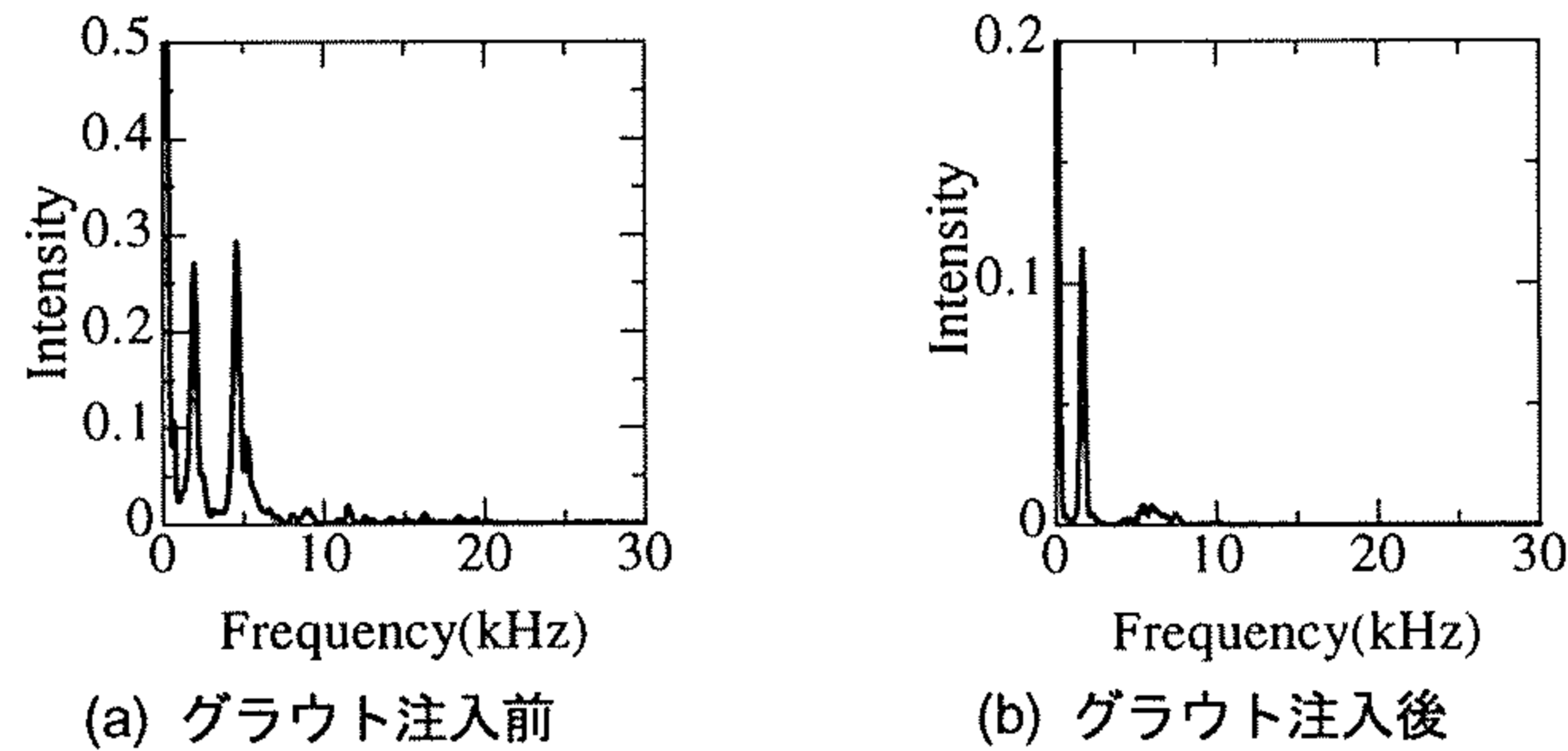


図-31 周波数分布（打撃方向2）

れる。また、本研究で用いた打撃方法にも改善の余地は残されているものと考えられ、さらに安定した入力を可能とする打撃装置の開発等を行うことが重要と考えられる。

c) 周波数分布

ここでも4章と同様打撃方向を図-20に示した2パターンとして実験を行った。得られた周波数分布を各打撃方向について図-30および31それぞれに示す。ここでも4章と同様各測定間に大きな違いは見られなかったため、代表的なものを示す。

打撃方向1（図-30）については、グラウト充填後は、グラウト充填前にみられた15kHz以上の成分がほとんどみられず、10kHz以下の領域に分布しており、その違いが明確に現れている。この傾向は4章において示した結果とも一致しており、実構造物においても周波数分布を用いた評価が可能であることを示すものと考えられる。また、保護コンクリート打設後については、グラウト注入後に比べてさらに低周波領域に周波数成分がシフトしている。これは、保護コンクリート部を打撃したことにより、PC鋼棒打撃と比較して、入力時点での周波数成分が低周波側にあった¹²⁾ことによるものと考えられる。

打撃方向2（図-31）では、グラウト注入前は周波数分布において2および4.5kHz付近に明確なピークが存在するのに対して、グラウト注入後ではこれらのピー

クのうち2kHz付近のピークのみ存在していることがわかる。これらのピークは、PC鋼棒を軸方向に対して垂直に打撃することによって生じた固有振動モードに起因すると考えられる。グラウトが存在する場合に2つ目のピークがみられないのは、グラウトの拘束の影響により、その周波数に相当する変形挙動が抑制されたためと考えられる。この傾向も4章において示した結果と一致しており、実構造物に適用する場合でも有効な方法となる可能性が考えられる。

なお、固有振動モードに関しては、今後解析による検討を加え、ピーク周波数の物理的意味について明らかにしていく予定である。

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) スラブ供試体（その1）において弾性波伝播速度とグラウト充填度の関係を検討した結果、グラウトの充填度が大きくなるにしたがって弾性波伝播速度は徐々に遅くなることが明らかとなった。
- 2) 3次元簡易モデルによるFEM解析を実施した結果、モデルにおける弾性波伝播挙動を視覚的に把握することができた。さらにこの傾向は供試体実験の結果と同様であった。
- 3) グラウトの充填形態およびPC部材の構成材料が異

- なる場合においても、弾性波伝播速度はグラウト充填度が増加するにしたがい減少する傾向がみられた。
- 4) PC鋼棒シリーズにおいて波形特性として立上がり時間を用いた結果、弾性波伝播速度と比較してシース内の空隙の存在がより明確に評価できる可能性が示された。ストランドシリーズではこのような関係は見られなかった。これは材料の構造によるものと考えられる。
 - 5) 周波数分布において、PC鋼棒シリーズではグラウトが0%の場合と100%の場合の違いを明確に評価できるが、部分的に存在する場合の評価は困難であった。ストランドシリーズでは、打撃方向1では鋼棒シリーズと異なり、部分充填されている場合に対しても評価可能であった。打撃方向2では、以上のケースとは異なり、グラウトが存在する場合でも周波数分布の形状やピーク周波数自体には変化がみられなかった。
 - 6) 実物PCタンクに本手法を適用した結果、弾性波伝播速度および周波数分布においては供試体実験と同様の傾向が得られ、実構造物に対する有効性が明らかとなった。本研究の範囲内では、立上がり時間を用いた場合は明確に評価することは困難であった。

今後は、特にストランドにおける波形立上がり時間による評価の可能性を明確にする必要がある。また、周波数分布におけるピーク周波数の物理的な意味を明確にしておけば、データの解釈がより明確になることが予想される。以上の点を明らかにすることで、本手法がより信頼性の高い評価手法へと発展するものと考えられる。

謝辞：本研究の実施にあたり、(株)安部工業所より多大なご助力を頂いた。記してここに深く謝意を表す。

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探査法, 土木学会論文集, No.402/V-10, pp.15-26, 1989.

- 2) 前田春雄, 長谷川敦史, 五阿彌雅夫: X線によるコンクリート構造物の非破壊検査, コンクリート構造物の耐久性に関するシンポジウム論文集, pp.109-115, 1988.
- 3) 坂田康徳, 大津政康: 超音波スペクトロスコピー法によるポストテンション PC 構造物のグラウト充填度評価, コンクリートの非破壊試験法に関するシンポジウム論文集, pp.87-92, 1991.
- 4) (社)日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書, pp.49-51, 2001.
- 5) Sansalone, M. and Streett, W. B. : *Impact Echo, Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, Ithaca, NY and Jersey Shore, PA, 1997.
- 6) Barbara J. Jaeger, Mary J. Sansalone and Randall W. Poston : *Detecting Voids Grouted Tendon Ducts of Post-Tensioned Concrete Structures Using the Impact-Echo Method*, ACI Structural Journal Vol.93, No.4, pp.462-473, 1996.
- 7) 黒野幸弘, 山田和夫, 中井裕司: 衝撃弾性波法を適用した PC 床板のグラウト充填性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.17, No.1, pp.1175-1180, 1995.
- 8) 斎藤宏行, 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1267-1272, 1999.
- 9) 永田智宏, 山田和夫, 中井裕司, 黒野幸弘: PC 床板の振動特性に着目した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.19, No.1, pp.1285-1290, 1997.
- 10) 魚本健人, 首藤芳久: AE 計測によるプレストレストコンクリートのシース内グラウト充填度判定方法, 生産研究, Vol.39, No.4, pp.141-144, 1987.
- 11) (社)日本非破壊検査協会: アコースティック・エミッション II, pp.49-54, 1996.
- 12) Carino N. J., Sansalone M. J. and Hsu N. N. : *A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete*, ACI Journal, pp.199-208, 1986.

(2002. 9. 3 受付)

EVALUATION METHOD FOR GROUTING CONDITION IN PC MEMBERS BASED ON ELASTIC WAVEFORM CHARACTERISTICS

Toshiro KAMADA, Masanori ASANO, Yasuhiro KUNIEDA, Minoru KUNIEDA
and Keitetsu ROKUGO

This paper describes the validity of parameters obtained from received waveform in Impact Elastic-Wave Methods for the evaluation of grouting condition in PC structure. In this study, both experimental and FEM analysis investigation was conducted. In experiment, relation between the propagation velocity, the frequency distribution and the risetime obtained from received waveforms and volume percentage of grout or difference of component material used in specimen. FEM analysis was carried out to understand the elastic wave behavior inside the specimen, which was visually identified. Finally, experiments of a real PC tank were carried out to confirm the practical applicability of this method.