

論文 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

黒野 幸弘*¹・山田 和夫*²・中井 裕司*³

要旨：本研究では、衝撃弾性波法を適用した PC 構造物のグラウト充填性評価の可能性について一連の検討を行った。その結果、衝撃弾性波の入力点から比較的近い位置にあるグラウト未充填部については、衝撃弾性波法によってある程度正確に評価できること、PC 鋼棒中を伝播する弾性波の減衰は、緊張力の導入およびグラウトの充填によって著しくなるため、衝撃弾性波法を適用してグラウト充填性を正確に評価するためには、検出波形に及ぼす減衰の影響を十分に考慮する必要があること、などが明らかとなった。

キーワード：PC 構造物、グラウト充填性、非破壊試験、衝撃弾性波法、減衰特性

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート構造物において、プレストレスを導入した PC 鋼材の破断事故がいくつか発生している。この PC 鋼材の破断原因としては、PC 鋼棒の腐食、水素脆性、施工不良などが考えられているが、これらのうちグラウトの充填不良に起因した PC 鋼棒の腐食破断が最も多いようである。

グラウトの充填性の確認方法としては、水または空気をグラウト部に注入して確認する方法以外にも、ファイバースコープを用いて目視する方法、X線を利用する方法、AE計測によって判断する方法などが提案されているが、施工管理に使用する方法としてはいずれの方法も実用的であるとはいえない。そのため、本研究では、筆者らが従来から検討している衝撃弾性波法 [1~4] を適用して、グラウトの充填状況を簡便に検査できるシステムの構築を目的として一連の基礎的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本実験では、衝撃弾性波法によるグラウトの充填性評価の可能性を調べるために、構造物内に直線配置された長さ 5m、緊張力 72kgf/mm² の B 種 2 号 PC 鋼棒を用いて、表-1 に示すような 2 シリーズの実験を実施した。すなわち、実験-I では実際に近いグラウト充填不良部を設けるために、PC 鋼棒の配置方向が垂直となるように試験体を立てた状態にしてグラウトを下端部から圧入し、上端部から 0、0.5、1.0 および 2.5m までの範囲でグラウトが充填されな

表-1 実験の概要
(a) 実験-I

記号	グラウト未充填位置	グラウト未充填長さ (m)
C1	端部	0.5
C2	端部	1.0
C3	端部	2.5
C10	無し	—

(b) 実験-II

記号	欠陥の位置	欠陥の長さ (m)	欠陥の形状	欠陥の数
C4	中間部	0.5	完全欠損	1
C5	中間部	1.0	完全欠損	1
C6	中間部	2.5	完全欠損	1
C7	中間部	1.0	完全欠損	2
C8	中間部	1.0	半断面欠損	1
C9	中間部	1.0	半断面欠損	2

*1 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (正会員)

*2 愛知工業大学助教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

*3 住友建設(株)技術研究所主任研究員 (正会員)

のように設定した試験体を使用し、実験－Ⅱでは試験体中央部のP C鋼棒周辺のかぶりコンクリートが長さ0.5、1.0および2.5m区間で一カ所または二カ所箱抜きされているモデル試験体（P C鋼棒が完全に露出している場合と断面の半分だけ露出している場合の2種類）を使用して衝撃弾性波の伝播特性に及ぼすグラウト充填状況の影響を調査した。なお、比較のためにC10試験体を用いて緊張力が0 kgf/mm²の場合およびグラウトが全く充填されていない場合の計測も行った。

2.2 試験体の製作および養生方法

本実験では、次に示す材料を用いて図－1に示すような2種類の試験体を製作した。

(1)コンクリート：早強ポルトランドセメント、栃木県安蘇郡葛生町産の砕砂（最大寸法＝5mm、表乾比重＝2.61）、栃木県上都賀郡栗野町産の砕石（最大寸法＝20mm、表乾比重＝2.63）および減水剤を使用し、設計基準強度を400kgf/cm²（水セメント比＝39.3％）、設計スランプを7cmに設定して試し練りによって調合を決定した。本実験で用いたコンクリートの調合表を表－2に示す。

(2)グラウト：普通ポルトランドセメントおよび膨張剤を使用し、水セメント比を45％に設定して調合を決定した。本実験で用いたグラウトの調合表を表－3に示す。

(3)P C鋼棒およびシース：φ26のB種2号D&W鋼棒およびφ32のシースを使用した。

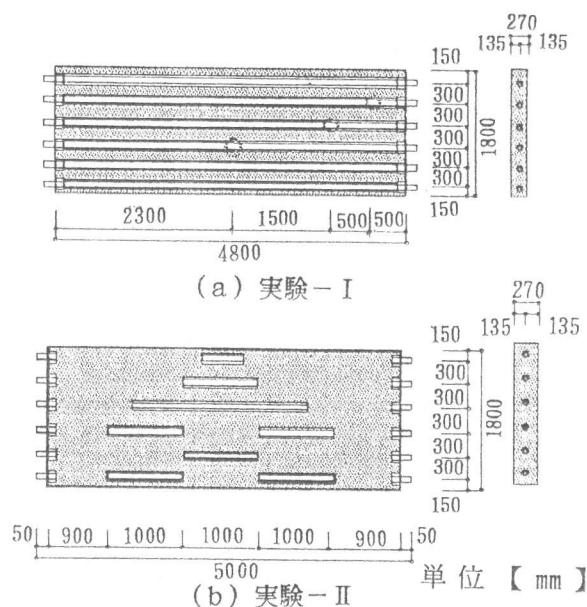
(4)用心鉄筋：D13異形鉄筋を150mm間隔で複配筋（かぶり厚さ＝50mm）して運搬時の試験体破損を防止した。

なお、試験体は、脱型後計測日まで屋外でシート養生を行った。

2.3 計測・処理方法

本実験で用いた計測システムのブロックダイアグラムを図－2に示す。計測に際しては、まず図－3に示すように、直径50mmの鋼球（質量：513.7g、落下高さ：18.7mm）を用いてP C鋼棒端部に衝撃弾性波を入力し、衝撃弾性波入力点の近傍および反対側のP C鋼棒端部の2箇所を超小型圧電型加速度ピックアップ（PV-91型）を設置して伝播弾性波を検出した。なお、加速度ピックアップは、マグネットアタッチメント

（VP-53B型）を用いてP C鋼棒に固定した。検出された弾性波は、チャージアンプ（UV-06型）で増幅した後、一旦マルチ・デジタイザ（APC-510型、サンプリング間隔および個数：3 μsおよび2048個／1データ、分解能：10bit）に記憶



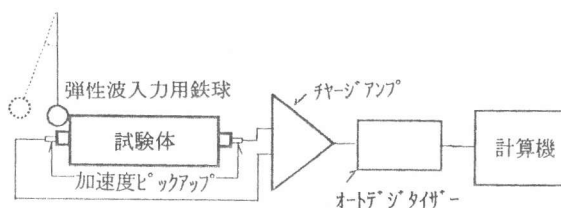
図－1 試験体の形状・寸法

表－2 コンクリートの調合表

W/C (%)	s/a (%)	標準調合 (kg/m ³)				
		水	セメント	砂	砂利	混和剤 (%)
39.3	40	157	400	727	1099	1.0

表－3 グラウトの調合表

W/C (%)	標準調合 (kg/m ³)		
	水	セメント	混和剤 (g)
45	35	80	960



図－2 計測システムのブロックダイアグラム

させ、その後に計算機に転送して各種の波形処理を行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 PC鋼棒中を伝播・反射する弾性波の基礎的特徴

図-4～図-6は、それぞれPC鋼棒の緊張力 (σ_t) が 0 kgf/mm^2 でグラウトが未充填、 $\sigma_t = 72 \text{ kgf/mm}^2$ でグラウトが未充填および $\sigma_t = 72 \text{ kgf/mm}^2$ でグラウトが完全に充填されている試験体によって得られた加速度波形の一例を示したもので、図(a)が衝撃弾性波入力点近傍、図(b)が反対側のPC鋼棒端部での結果である。

なお、検出波形は何れの場合も衝撃弾性波入力点近傍のPC鋼棒端部で得られた最大加速度で除して無次元化してある。これらの図によれば、グラウトが未充填の場合には、緊張力 (σ_t) が 0 kgf/mm^2 (図-4参照) であると伝播波の減衰も殆ど認められず、かつPC鋼棒終端からの反射波も明確に検出されているが、緊張力が導入される(図-5参照)と、伝播波の減衰が著しくなるとともにPC鋼棒終端からの反射波以外の成分が多く含まれるようになるため、反射波の検出が若干難しくなる傾向を示している。また、PC鋼棒の周囲にグラウトが充填されると、図-6に示すように伝播波の減衰はさらに著しくなり、PC鋼棒終端からの反射波の検出は可能ではあるもののかなり難しくなるのがわかる。

一方、検出波形の周波数特性に注目してみると、グラウトが未充填で $\sigma_t = 0 \text{ kgf/mm}^2$ の場合には、衝撃弾性波入力点近傍および反対側のPC鋼棒端部で検出された加速度波形の周波数特性は、図-7に示すように、いずれも5～7kHzの周波数成分が比較的卓越した特性を示しているが、緊

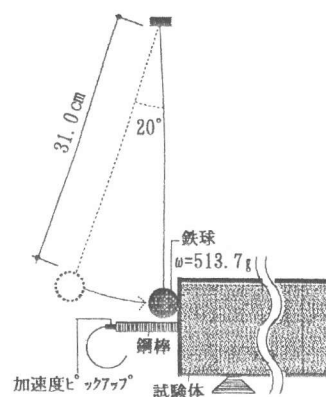


図-3 弾性波の入力方法

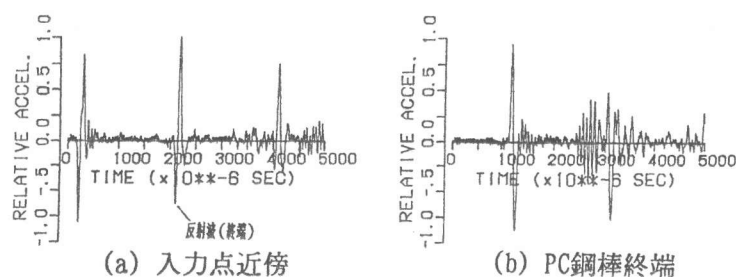


図-4 検出加速度波形 (C10)
(緊張力: 0 kgf/mm^2 、グラウト: 未充填)

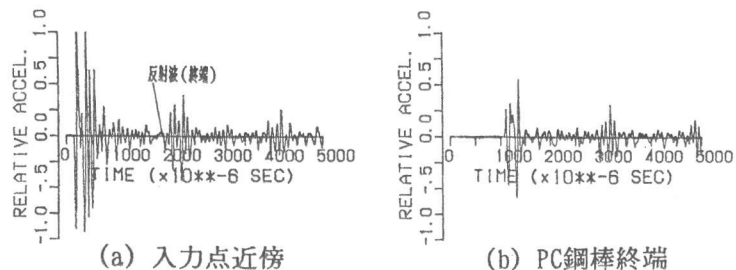


図-5 検出加速度波形 (C10)
(緊張力: 72 kgf/mm^2 、グラウト: 未充填)

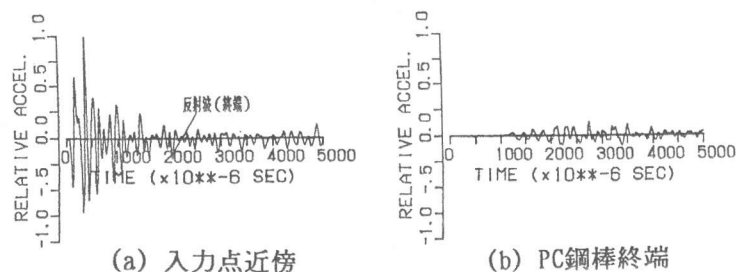


図-6 検出加速度波形 (C10)
(緊張力: 72 kgf/mm^2 、グラウト: 充填)

張力が導入されると緊張力に応じてPC鋼棒の固有振動数が増大していくため、PC鋼棒両端部で検出された加速度波形は、図-8に示すように、いずれもこれらの周波数成分にさらに12~13kHzのかなり卓越した周波数成分が重ね合わされ、相対的に高周波数成分の卓越した特性へと変化しているのがわかる。ただし、PC鋼棒終端部で検出された波形は、緊張力の導入によって衝撃弾性波入力点近傍で検出された波形と比較して全周波数領域に亘って約0.7倍程度減衰しているのが読み取れる。これに対して、PC鋼棒の周囲にグラウトが充填されると、図-9から明らかなように、伝播弾性波の減衰は約0.2倍程度とさらに著しくなり、グラウトが充填されていない場合と比較して10kHz以上の高周波数成分の減衰が

相対的に著しくなるという特徴を示している。このことは、反射弾性波の特性だけでなく、伝播弾性波の減衰特性およびその周波数特性に着目することによってもグラウトの充填性を評価できる可能性のあることを示唆している。

3.2 試験体端部のグラウトが未充填の場合

図-10(a)~(c)は、グラウトの未充填側から衝撃弾性波を入力した場合の弾性波入力点近傍のPC鋼棒端部で得られた加速度波形をグラウト未充填長さ別に示したものである。これらの図によれば、グラウトの未充填側から衝撃弾性波を入力した場合には、グラウトの未充填長さにかかわらずグラウト未充填/充填境界からの反射波をある程度明確に検出できていることがわかる(本研究では、滑らかな包絡線で近似した自由減衰曲線から逸脱している波を原則として反射波とみなした)。これは、弾性波動がグラウト未充填部では殆ど減衰しないのに対して、グラウト充填部では減衰が著しいため、グラウト未充填/充填の境界があたかも反射率の大きい固定端のような働きをするためと考えられる。ただし、この境界からの反射波が到達した後の波形は減衰が著しく、その後に続くPC鋼棒終端からの反射波の検出は困難である。なお、伝播弾性波の周

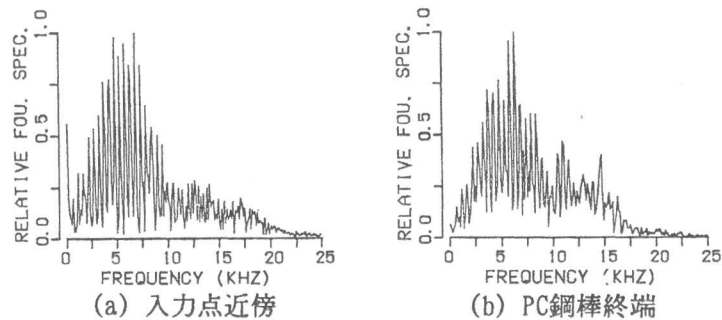


図-7 検出加速度波形の周波数特性 (C10)
(緊張力: 0 kgf/mm²、グラウト: 未充填)

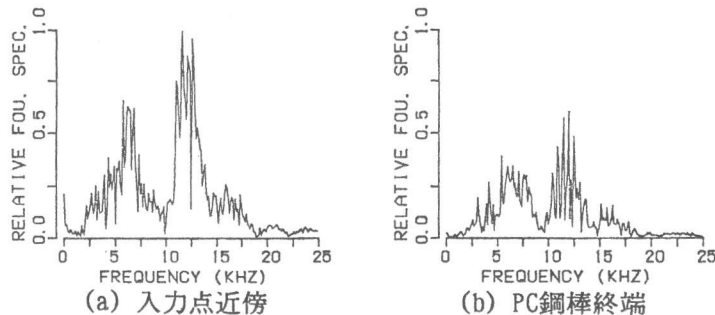


図-8 検出加速度波形の周波数特性 (C10)
(緊張力: 72 kgf/mm²、グラウト: 未充填)

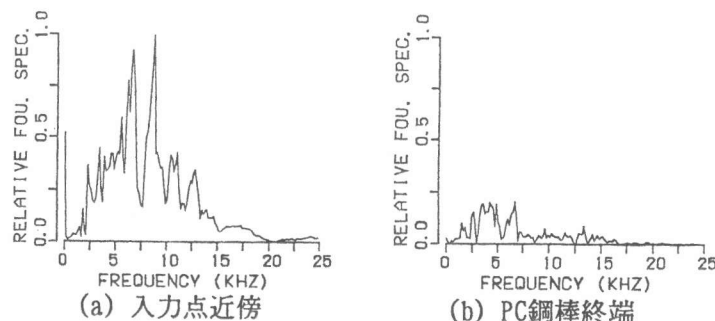
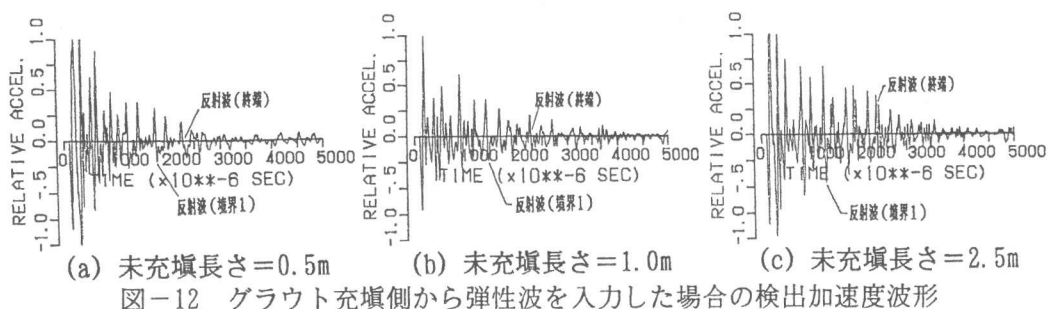
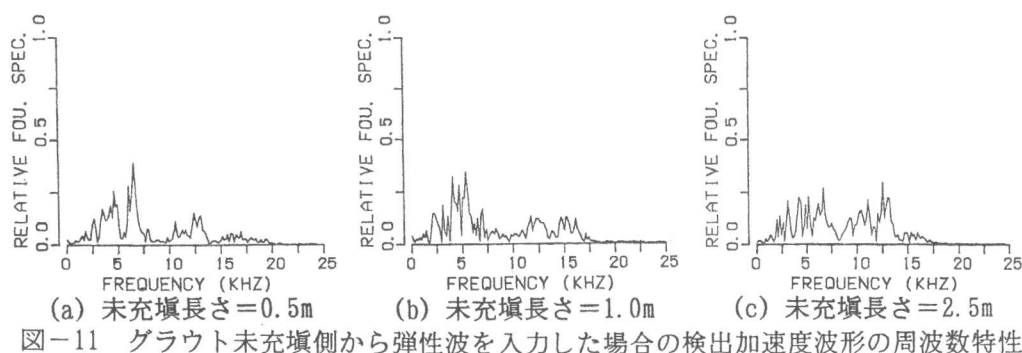
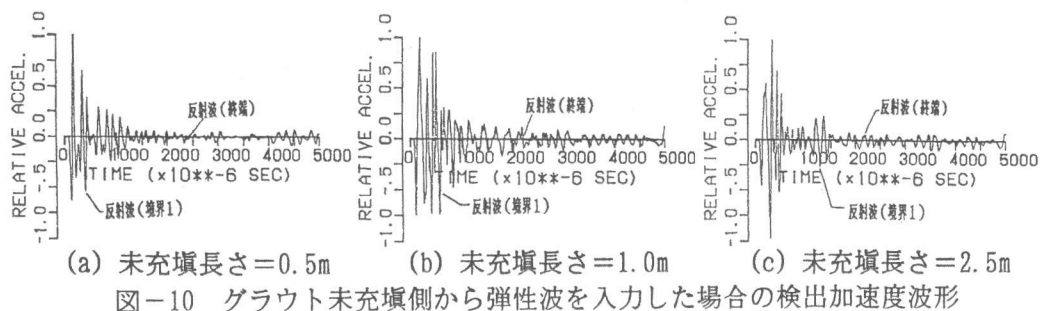


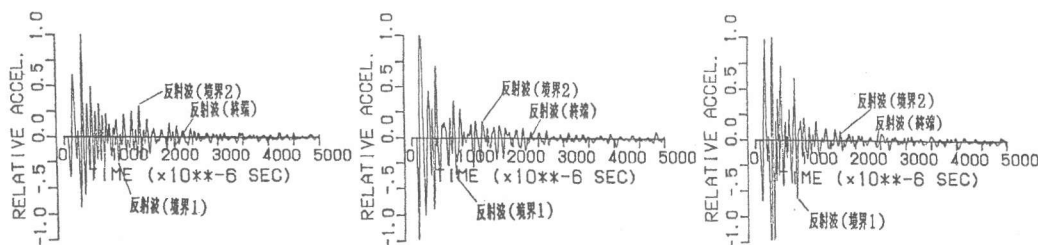
図-9 検出加速度波形の周波数特性 (C10)
(緊張力: 72 kgf/mm²、グラウト: 充填)



波数特性は、図-11(a)～(c)に示すように、グラウト充填区間が長く（グラウト未充填区間が短く）なるに従って約8kHz以上の高周波数成分の減衰が相対的に著しくなる傾向を示している。これは、弾性波がグラウト充填部を伝播するときに生じる距離減衰によるものと思われる。これに対して、グラウトが充填されている側から衝撃弾性波を入力した場合の検出波形には、図-12(a)～(c)から明らかなように、グラウトの充填／未充填境界およびP C鋼棒終端からの反射波以外の成分が多く含まれているため、前掲の図-10(a)～(c)の場合と比べてこれらの境界から反射した波の検出は難しくなっている。

3.3 試験体中央部のグラウトが未充填の場合

図-13(a)～(c)は、グラウト未充填部が試験体中央に一カ所ある場合の測定結果をグラウト未充填長さ別に示したものである。これらの図によれば、衝撃弾性波をグラウトが充填されている側から入力しているにもかかわらず、グラウトの充填／未充填境界およびそれに続く未充填／充填境界からの反射波がある程度検出できているのがわかる。これは、弾性波入力点からグラウトの未充填位置までの距離が前掲の図-12(a)～(c)の場合と比較して短いためではないかと思われる。なお、P C鋼棒終端からの反射波は、検出できているものも一部は認められるが、弾性波の減衰が著しくて検出できていないものが多い。また、図-14は、グラウトの未充填部が二カ所ある場合の測定結果を示したものであるが、この場合にも各グラウトの充填／未充填境界および未充填／充填境界からの反射波を読み取ることができる。



(a) 未充填長さ=0.5m (b) 未充填長さ=1.0m (c) 未充填長さ=2.5m

図-13 試験体中央部にグラウト未充填部がある場合の検出加速度波形

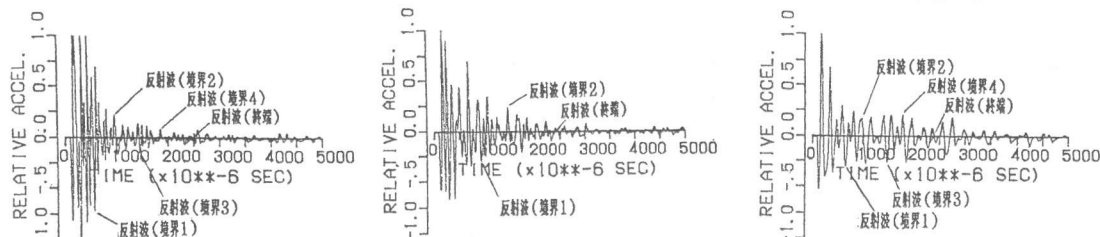


図-14 グラウト未充填部が二ヶ所ある場合の検出加速度波形

(a) グラウト未充填部が一ヶ所の場合 (b) グラウト未充填部が二ヶ所の場合

図-15 グラウト未充填部が鋼棒断面の半分だけ露出している場合の検出加速度波形

図-15(a)および(b)は、グラウト未充填部のPC鋼棒の断面が半分だけ露出している場合の測定結果を示したものである。これらの図によれば、検出された加速度波形は、前掲の図-13(b)および図-14とほぼ同様の特徴を示しており、本実験結果の範囲においては検出波形に及ぼすPC鋼棒の露出深さの影響は殆ど認められない。

4. 結 論

本研究では、プレストレストコンクリート構造物のグラウト充填性を非破壊的に評価する方法の確立を目的とした基礎的研究として、衝撃弾性波法の適用性について実験的に検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 衝撃弾性波の入力点から比較的近い位置にあるグラウトの未充填部については、本研究で取り上げた衝撃弾性波法によってある程度正確に評価することができる。
- 2) PC鋼棒中を伝播する弾性波の減衰は、緊張力の導入およびグラウトの充填によって著しくなるため、衝撃弾性波法を適用してグラウト充填性を正確に評価するためには、検出波形に及ぼす減衰の影響を十分に考慮する必要がある。
- 3) グラウト未充填部からの反射波の特性だけでなく、グラウト未充填部を伝播した弾性波の減衰特性およびその周波数特性に着目することによってもグラウトの充填性を評価することが可能である。

謝 辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た愛知工業大学学部学生の高見久美嬢および玉木徹也君に対して謝意を表します。

引用文献

- 1) 桃木佳子・山田和夫・林 隆浩・阿部秋男：衝撃弾性波法を適用した鉄筋の腐食推定に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.607-612、1993.6
- 2) 林 隆浩・山田和夫・阿部秋男・桃木佳子：腐食した鉄筋内部の弾性波動伝播特性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.15、No.1、pp.649-654、1993.6
- 3) 桃木佳子・山田和夫・林 隆浩・阿部秋男：衝撃弾性波法を適用した異形鉄筋の形状推定に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.759-764、1994.6
- 4) 山田和夫・桃木佳子・林 隆浩・阿部秋男：コンクリート基礎杭内部の弾性波動伝播特性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.268-273、1994.12