Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, No. 1, 1996

論文　PC床板のグラウト充填評価に関する衝撃弾性波法の適用性

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性能に及ぼす計測・処理方法の影響について一連の検討を行った。その結果、衝撃弾性波の入力位置をアンカープレートとした場合には、グラウトの未充填部およびPC鋼棒終端からの反射波以外の成分を多く含んだ波形が検出されるため、グラウト充填状況を正確に判定するには、伝播弾性波の指向性と反射波の検出性能が向上するように衝撃弾性波をPC鋼棒から直接入力した方がよいこと、弾性波の距離減衰を考慮することによってグラウト充填性の推定精度が向上すること、などが明らかとなった。

キーワード：PC床板、グラウト充填性、非破壊試験、衝撃弾性波法、反射波、距離減衰

1．はじめに

既報[1),2)]では、PC床板のグラウト充填状況を簡便に検査できる非破壊検査システムの構築を目的として、筆者らが従来から検討している衝撃弾性波法[3),4)]の適用性について検討を行った。その結果、衝撃弾性波の入力源として鋼球を用いた場合、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、衝撃弾性波法によってある程度正確に評価できるが、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考慮する必要があることなどの知見を得た。本報では、これらの研究の延長として、グラウト充填不良箇所からの反射波をより明確に抽出でき、かつグラウトの充填評価が容易となるような衝撃弾性波の入力位置や入力方法および測定データの処理方法について検討を行った。

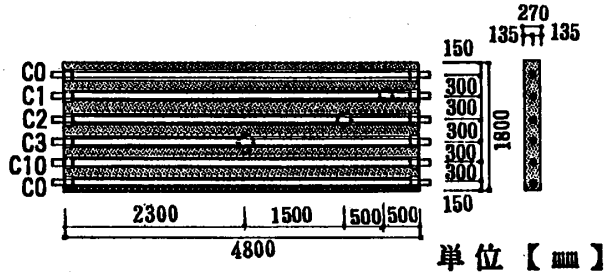
2．実験方法

2.1 実験の概要

本実験では、既報[1),2)]と同様に長さ5m、緊張力72kgf/mm^{2}のB種2号PC鋼棒が直線配置され、端部から0、0.5、1.0、2.5および5mまでの範囲でグラウトが充填されていないPC床板（図－1および表－1参照）を用いて、次に示すような衝撃弾性波の伝播・反射特性とグラウト充填状況との関係に及ぼす計測・処理方法の影響について調べた。

表－1　実験の概要

記号	グラウト未充填位置	グラウト未充填長さ (m)
C0	全体	5.0
C1	端部	0.5
C2	端部	1.0
C3	端部	2.5
C10	無し	—



図－1　試験体の形状・寸法

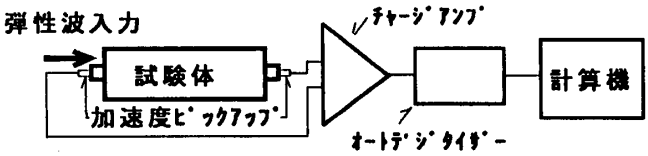
2.2 計測・処理方法

＊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）

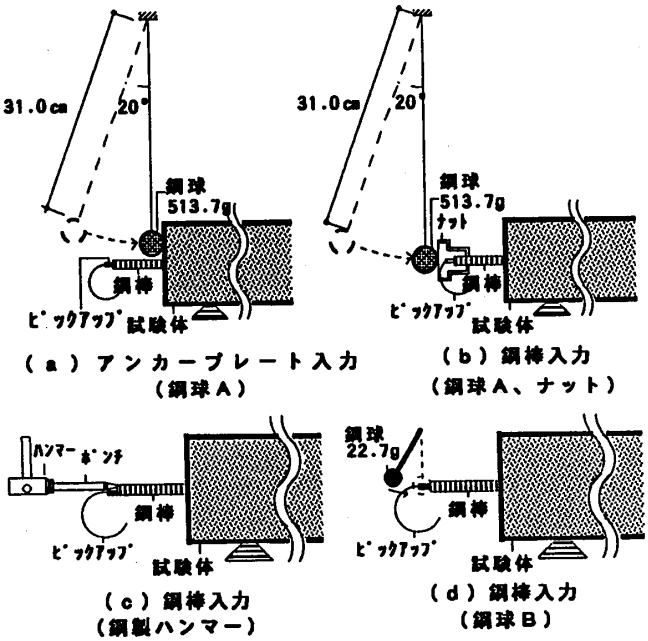
NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

本実験で用いた計測システムのブロックダイヤグラムを図－２に示す。計測に際しては、まず図－３(a)～(d)に示すような4種類の方法を用いてPC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PC鋼棒端部の2箇所に超小型圧電型加速度ピックアップ（PV-91型）を設置して反射および伝播弾性波を検出した。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：2μsおよび2048個／1データまたは3072個／1データ、分解能：10bit）に記憶させ、その後に計算機に転送して各種の波形処理を行った。



図－２　計測システムのブロックダイヤグラム



図－３　弾性波の入力方法

なお、本研究ではグラウト充填不良箇所からの反射波をより明確に抽出できるようにするために、弾性波が

$$P_x = P_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot X) \quad \cdots\cdots (1)$$

ここに、X：弾性波の伝播距離、P_0：X＝0の場所（基準位置）での検出弾性波の振幅、

P_x：Xだけ伝播後の検出弾性波の振幅、α：減衰定数

なる関係に従って減衰する[5]ものと仮定して、弾性波の距離減衰を考慮して検出波形の補正を行う方法についても検討した。

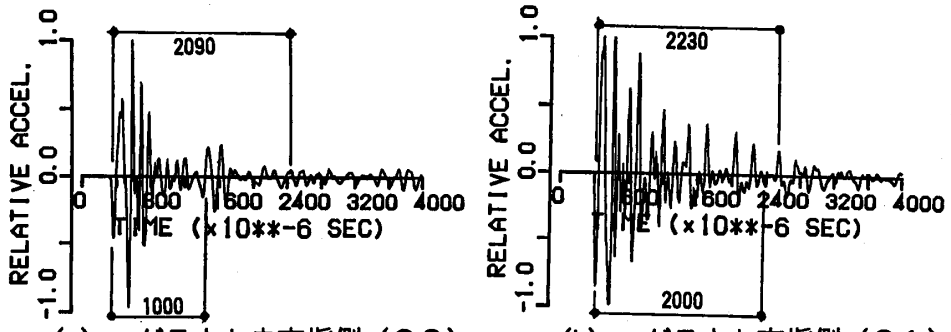
３．実験結果とその考察

３．１　衝撃弾性波の伝播・反射特性

(１)衝撃弾性波の入力位置および入力方法の影響

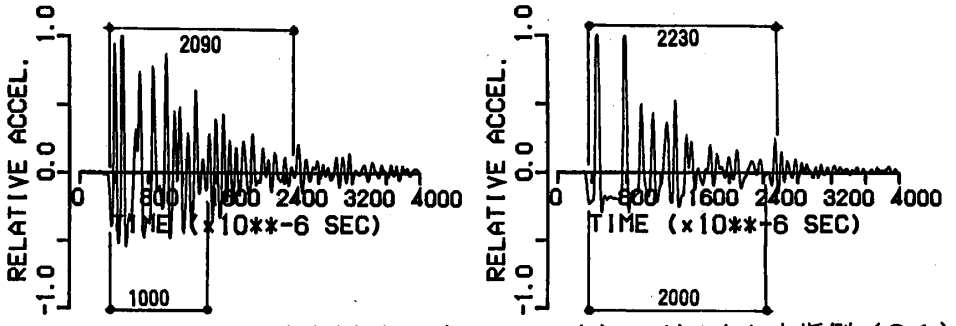
図－４および図－５は、それぞれ鋼球Aをアンカープレートおよび PC鋼棒に固定されているナットに自然落下させることによって発生させた衝撃弾性波を用いた場合の衝撃弾性波入力点近傍で検出された無次元化加速度波形の一例を示したもので、図(a)がグラウト未充填側、図(b)がグラウト充填側から衝撃弾性波を入力した結果である。なお、図中にはグラウトの未充填および充填部のPC鋼棒中を伝播する弾性波の実測伝播速度（それぞれ5200m/sおよび4400m/s）を用いて算定されるグラウト未充填／充填境界およびPC鋼棒終端からの反射波到達予想時刻が併示してある。まず、アンカープレートから衝撃弾性波を入力した場合（図－３(a)参照）に注目してみると、図－４から明らかなように、グラウト未充填側から衝撃弾性波を入力した場合の検出波形は、グラウト未充填／充填境界からの反射波はある程度明確に検出できているが、グラウト充

NII-Electronic Library Service



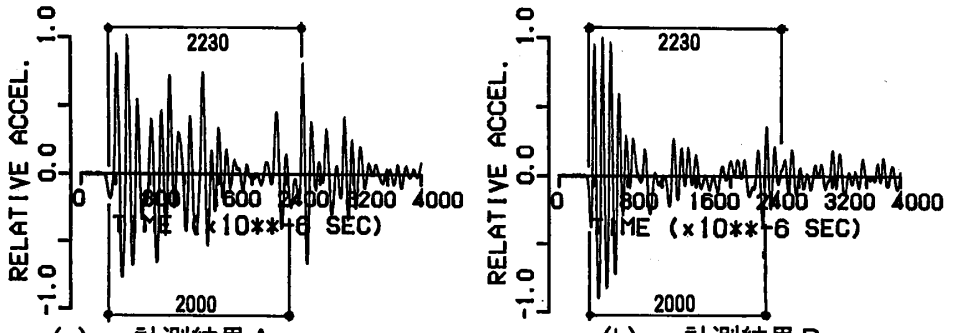
(a)　グラウト未充塡側（C３）　　(b)　グラウト充塡側（C１）

図－４　弾性波をアンカープレートに入力した場合の検出加速度波形
（鋼棒長さ：５m、緊張力：７２kgf/mm²、鋼球Ａ）



(a)　グラウト未充塡側（C３）　　(b)　グラウト充塡側（C１）

図－５　弾性波を直接ＰＣ鋼棒に入力した場合の検出加速度波形
（鋼棒長さ：５m、緊張力：７２kgf/mm²、鋼球Ａ、ナット使用）



(a)　計測結果Ａ　　(b)　計測結果Ｂ

図－６　弾性波をグラウト充塡側から
直接ＰＣ鋼棒に入力した場合の検出加速度波形（Ｃ１）
（鋼棒長さ：５m、緊張力：７２kgf/mm²、鋼製ハンマー）

塡側から衝撃弾性波を入力した場合には反射波以外の成分が多く含まれているため、この境界から反射してきた波の検出は難しくなっている。また、いずれの場合も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さらに困難であることがわかる。一方、ナットを介してPC鋼棒に直接衝撃弾性波を入力した場合（図－３(b)参照）には、図－５に示すように、グラウト未充塡側だけでなく、グラウト充塡側から衝撃弾性波を入力した場合にも、グラウト充塡／未充塡境界からの反射波が明確に検出できている。これは、衝撃弾性波をPC鋼棒から直接入力することで、弾性波の指向性を高めることができるためと考えられる。ただし、その後に続くPC鋼棒終端からの反射波の検出は難しくなっている。

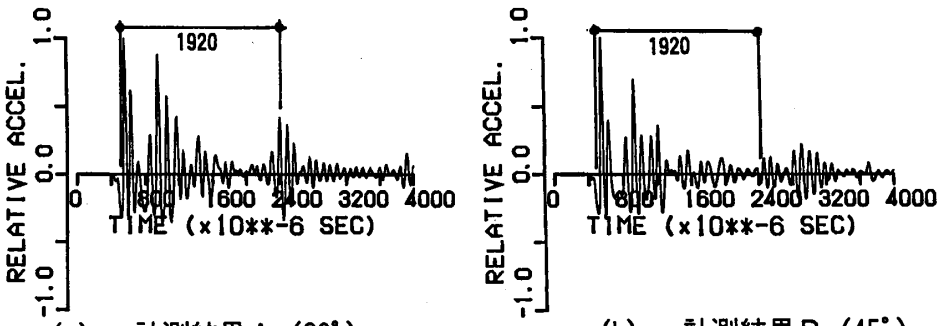
図－６は、グラウト充塡側から鋼製ハンマーを用いて直接衝撃弾性波をPC鋼棒に入力した場合（図－３(C)参照）の結果を示したものである。この図によれば、グラウト充塡／未充塡境界からの反射波は、図－５(b)と比較してさらに明確となっており、PC鋼棒終端からの反射波も明確に検出できているのがわかる。これは、衝撃弾性波の入力位置にナットのような介在物がないと、弾性波の指向性がさらに高められるためと考えられる。ただし、図－６の(a)と(b)は、どちらも同じ方法で計測した結果であるが、境界からの反射波以外の波形成分はかなり異なった特

NII-Electronic Library Service

徴を示している。これは、鋼製ハンマーを叩くことによって発生させた衝撃弾性波が個々に微妙に相違するためであり、再現性という点では問題があるといえる。

(2)衝撃弾性波の入力エネルギーの影響

図－7(a)および(b)は、グラウト未充填試験体に対して、鋼球の落下角度をそれぞれ20°および45°に設定して衝撃弾性波を入力した場合の検出加速度波形を示したものである。図によれば、グラウトが未充填で弾性波の入力エネルギーが適当の場合には、図－7(a)のようにPC鋼棒終端からの反射波の特定は容易であるが、弾性波の入力エネルギーが大き過ぎる場合には、図－7(b)のように逆に反射波の特定が困難となる可能性のあることがわかる。これは、検出ピックアップの感度と設置方法、対象とする試験体の形状・寸法などに応じた最適の入力エネルギー量が存在することを示唆しており、衝撃弾性波を入力する際に注意する必要のある点といえる。

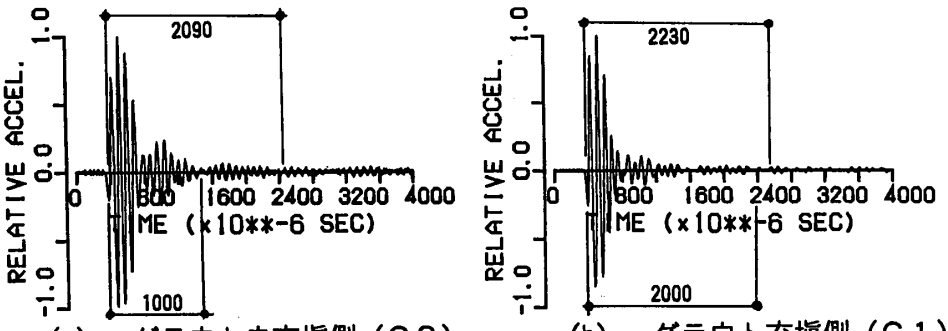


(a)　計測結果A（20°）　　(b)　計測結果B（45°）

図－7　弾性波を直接PC鋼棒に入力した場合の検出加速度波形（CO）
（鋼棒長さ：5m、緊張力：72kgf/mm²、鋼球A、ナット使用）

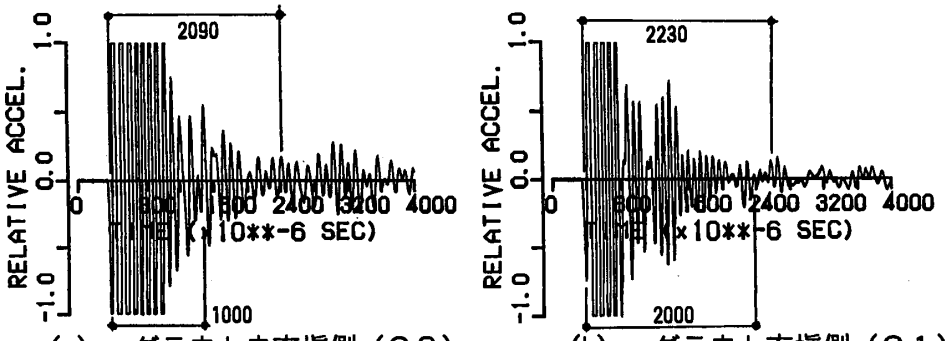
(3)検出波形の後処理の影響

図－8(a)および(b)は、それぞれ質量の小さい鋼球Bを用いて衝撃弾性波をグラウト未充填およびグラウト充填側から直接PC鋼棒に入力した場合（図－3(d)参照）の加速度波形を示したものである。これらの図からは、グラウト充填／未充填境界およびPC鋼棒終端からの反射波を認識することは困難で



(a)　グラウト未充填側（C3）　　(b)　グラウト充填側（C1）

図－8　弾性波を直接PC鋼棒に入力した場合の検出加速度波形
（鋼棒長さ：5m、緊張力：72kgf/mm²、鋼球B）

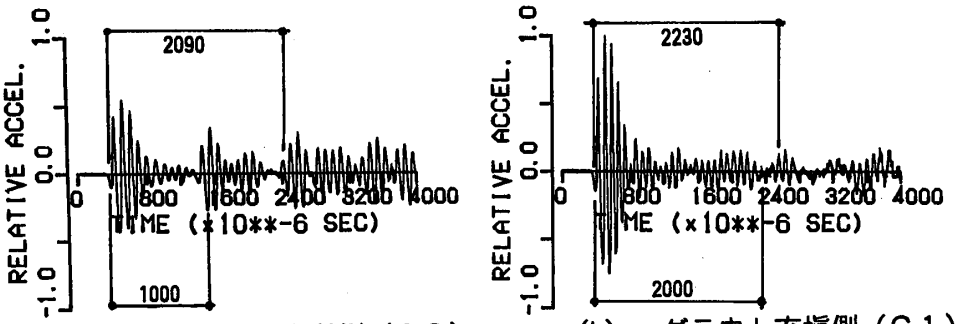


(a)　グラウト未充填側（C3）　　(b)　グラウト充填側（C1）

図－9　検出加速度波形を増幅した結果
（鋼棒長さ：5m、緊張力：72kgf/mm²、鋼球B）

NII-Electronic Library Service

あるが、縦軸（加速度軸）を拡大してみると、図－9に示すように境界からの反射波が明確に検出できているのがわかる。これは、入力波と反射波のエネルギー量の差が大き過ぎるため、図－8のように入力時刻と反射波到達時刻付近での検出波形を同一スケールで観察している範囲では、反射波が認識できなかったためである。例えば、式(1)で表されるような弾性波の距離減衰を考慮して検出波形を減衰がない場合に換算してみると、図－10に示すように、境界からの反射波が明確に検出できるようになる。

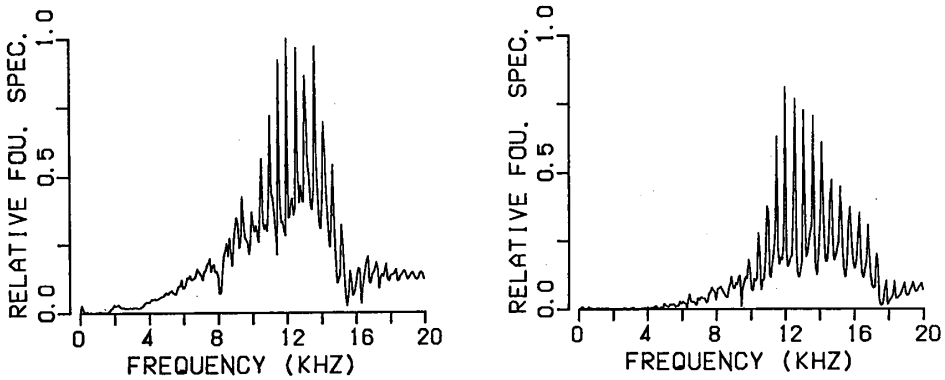


(a)　グラウト未充填側（C３）　　(b)　グラウト充填側（C１）

図－10　距離減衰を考慮して検出加速度波形を補正した結果
（鋼棒長さ：５m、緊張力：７２kgf/mm²、鋼球B）

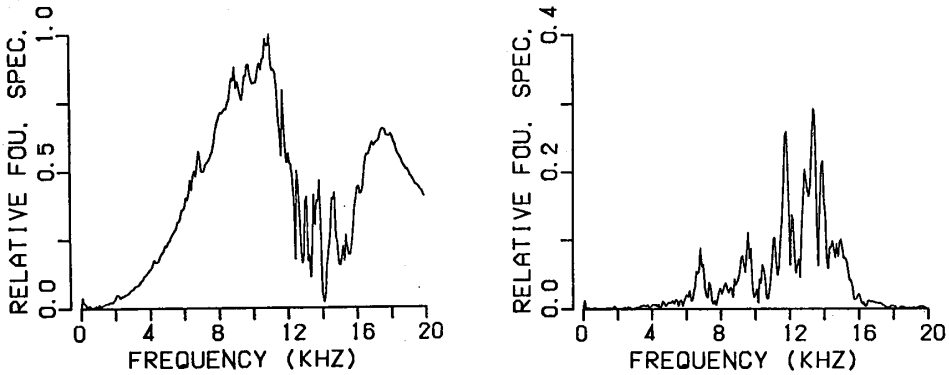
３.２ 検出弾性波の周波数特性

図－11および図－12は、それぞれグラウトが未充填および完全に充填されている試験体に対して前掲の図－３(d)の方法で測定した場合に得られた検出加速度波形の周波数特性を示したものである。なお、フーリエ振幅値は衝撃弾性波入力点近傍で検出された波形の最大フーリエ振幅値（図(a)の最大値）で除して無次元化してある。まず、グラウトが未充填の場合の結果に注目してみると、PC鋼棒終端部で検出された伝播弾性波の周波数特性は、図－11(b)に示すように衝撃弾性波入力点近傍で検出されたものと比較して約0.7倍程度の減衰が認められるが、周波数特性の全体的な傾向は検出位置によってそれほど影響を受



(a)　入力点近傍　　(b)　ＰＣ鋼棒終端

図－11　検出加速度波形の周波数特性
（鋼棒長さ：５m、緊張力：７２kgf/mm²、グラウト：未充填）



(a)　入力点近傍　　(b)　ＰＣ鋼棒終端

図－12　検出加速度波形の周波数特性
（鋼棒長さ：５m、緊張力：７２kgf/mm²、グラウト：充填）

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

けておらず、いずれも大局的には約12～14kHzの周波数成分が卓越した特性を示しているのがわかる。なお、PC鋼棒は固定端部で約20cm露出しているが、この20cmの区間で弾性波が多重反射しているものと仮定すると、反射波の到達時間間隔は約78μsでその周波数は12.8kHzとなる。したがって、上記の卓越周波数は、PC鋼棒の固定端部の区間で弾性波が多重反射波している結果を反映したものといえる。また、図－11に示されている周波数特性には、約520Hzの間隔で局所的に卓越する周波数成分が存在しているが、この520Hzの周波数は、長さ5mの鋼棒が縦振動するときの１次共振周波数（512Hz）に相当している。一方、グラウトが完全に充填されている場合になると、PC鋼棒終端部で検出された伝播弾性波の減衰は、図－12(b)に示すように約0.2倍程度とさらに著しくなり、全体的な周波数特性もグラウトが未充填の場合と比較してかなり相違したものとなっている。すなわち、伝播弾性波の周波数特性は、約12kHzの周波数成分以外にも7kHzと9.5kHzの周波数成分が卓越した特性へと変化し、かつグラウトが未充填の場合には約520Hzの周波数間隔で顕著に認められた局所的な鋭いピークがグラウトの充填によってかなり滑らかとなり、長さ5mの区間での縦振動の抽出が難しくなっているのがわかる。

なお、グラウト充填試験体で観察された7kHzと9.5kHzの卓越周波数とPC鋼棒の振動モードとの関係については、本研究の範囲では明らかではないため、これらに関しては、今後周波数応答解析およびモード解析を行って詳細に検討していく予定である。

4．むすび

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方法の確立を目的とした基礎的研究として、試験結果に及ぼす計測・処理方法の影響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）グラウト未充填部およびPC鋼棒終端からの反射波を明確に抽出するためには、伝播弾性波の指向性がよくなるようにPC鋼棒から直接衝撃弾性波を入力し、反射波の検出性能を向上させる必要がある。

2）試験体に衝撃弾性波を入力する際、検出加速度計の感度と設置方法、対象とする試験体の形状・寸法などに応じた最適の入力エネルギー量が存在することを踏まえて、入力方法を選択する必要がある。

3）伝播弾性波の距離減衰を考慮することによって、衝撃弾性波法によるグラウト充填性の評価性能を向上させることができる。

4）検出弾性波の周波数特性、特に卓越周波数の出現状況とPC鋼棒の振動モードとの関係に着目することによって、グラウトの充填性を評価できる可能性がある。

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永谷　司君および舟本尚司君に対して謝意を表します。

引用文献

1）黒野幸弘・山田和夫・中井裕司：衝撃弾性波法を適用したPC床版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、1995.6

2）黒野幸弘・山田和夫・中井裕司：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.49、pp.616－621、1995.12

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

4）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

5）日本学術振興会編：超音波探傷法（改訂新版）、日刊工業新聞社、pp.72－73、1987.1

NII-Electronic Library Service