

# 論文 衝撃弾性波法を適用した非破壊試験に対するウェーブレット解析の適用性

永田智宏\*1・山田和夫\*2・松元香保里\*3

**要旨：**本研究では、衝撃弾性波法を適用したコンクリートの非破壊試験に対するウェーブレット解析の適用性をロックボルトの施工品質評価を対象に取り上げて一連の実験的検討を行った。その結果、ウェーブレット解析を用いることによって検出の対象とする周波数成分の波形を時系列データのまま抽出することが可能であること、衝撃弾性波法に対するウェーブレット解析手順が標準化できれば、ロックボルトの施工品質の推定精度が飛躍的に向上する可能性があること、などが明らかとなった。

**キーワード：**非破壊試験, 衝撃弾性波法, ロックボルト, 反射波, ウェーブレット解析

## 1. はじめに

筆者らは、これまでにコンクリート内部鉄筋の腐食評価<sup>1)</sup>、コンクリート基礎杭の施工品質評価<sup>2)</sup>、PC床板のグラウト充填性評価<sup>3)</sup>を対象とした衝撃弾性波法の適用性について一連の検討を行い、その有効性を指摘したが、検出弾性波の中には、一般的に評価の対象とする弾性波以外にも各種の雑音が含まれているため、波形処理結果を正確に評価するにはかなりの熟練が必要であり、衝撃弾性波法をコンクリートの非破壊試験法として標準化するには、検出弾性波の波形処理方法に関して、今後さらなる工夫が必要であるものと思われる。

最近、信号処理の分野で注目を集めているウェーブレット解析<sup>4)</sup>は、その特徴として、より大きな信号の局所的な部分を解析することによって、従来の信号処理手法では見落としてしまうトレンド、ブレイクポイント、高次の微係数の不連続性、自己相似性などの情報を取り出す機能や、信号の質を低下することなく圧縮や雑音を除去できる機能があり、今後の波形処理手法として期待されている。本研究では、この点を踏まえて、衝撃弾性波法を適用したコンクリ

ートの非破壊試験に対するウェーブレット解析の適用性について一連の実験的検討を行った。

## 2. 実験方法

本研究では、衝撃弾性波法による評価の対象としてトンネルロックボルトの施工品質評価を取り上げ、表-1、図-1および図-2に示すような2シリーズの実験を行った。すなわち、

表-1 実験の概要  
(a)実験-I

記号	鋼棒長さ(m)		グラウト充填状況
	外部	内部	
A1	0.05	0.95	完全充填
A2	0.1	0.95	完全充填
A3	0.15	0.95	完全充填
A4	0.05	0.95	完全未充填
A5	0.1	0.95	完全未充填
A6	0.15	0.95	完全未充填

(b)実験-II

記号	鋼棒長さ(m)		グラウト充填状況
	外部	内部	
B1	0.05	2.95	完全充填
B2	0.05	2.95	完全未充填
B3	0.05	2.95	手前 0.5m 未充填
B4	0.05	2.95	先端 0.5m 未充填
B5	0.05	2.95	手前 1.0m 未充填
B6	0.05	2.95	中央 1.0m 未充填
B7	0.05	2.95	先端 1.0m 未充填
B8	0.05	2.95	手前 2.0m 未充填
B9	0.05	2.95	先端 2.0m 未充填

\*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)技術研究所研究員 (正会員)

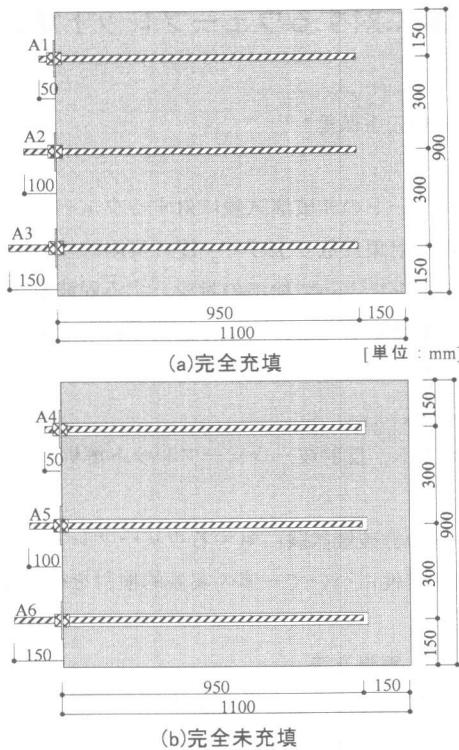


図-1 試験体の形状・寸法(実験-I)

実験-Iでは長さ1mのロックボルト(D25異形棒鋼)が完全充填および完全未充填(φ38mmのシース管によって未充填部を確保した)の状態に設定されている試験体(図-1および表-1(a)参照)を用いて、検出波形に及ぼす露出ボルト長さの影響について調査し、実験-IIでは、長さ3mのロックボルトが完全充填、完全未充填、並びに未充填区間が0.5, 1.0および2.0mに設定されている試験体(図-2および表-1(b)参照)を用いて、検出弾性波の各種特性とロックボルトの埋設状況との関係について調査した。図-3に本実験で用いた計測システムのブロック図を示す。計測に際しては、図-4に示すような衝撃弾性波入力用アタッチメントをロックボルト端部に取り付け、アタッチメント端部をけがき棒で打撃することにより衝撃弾性波を入力した。伝播・反射弾性波は、ロックボルト端部とロックボルト先端上部の試験体表面の2箇所ニビニールテープによって固定したマグネット付き超小型圧電型加速度ピックアップ

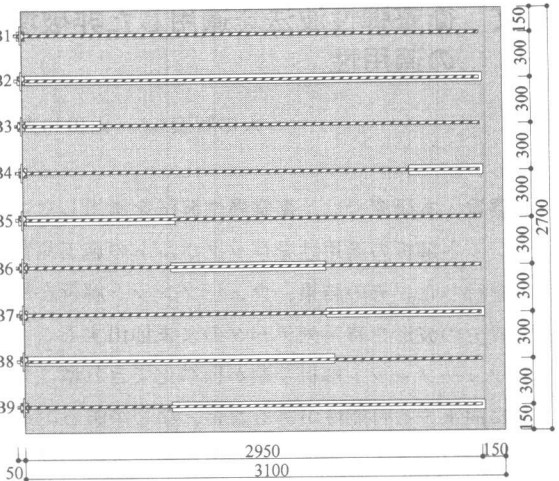


図-2 試験体の形状・寸法(実験-II)

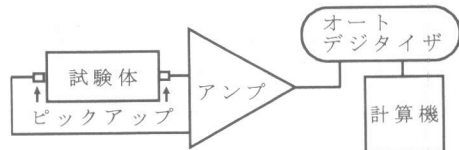


図-3 計測システムのブロックダイアグラム

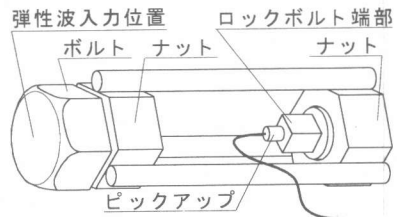


図-4 弾性波の入力方法

ックアップを用いて検出した。なお、本計測では、データ総数は原則として4096個とし、サンプリング間隔は、衝撃弾性波の伝播速度とロックボルトの長さを考慮して、全ての場合について0.5μsおよび3μsの2種類に設定したが、周波数解析を行うために計測したデータについては、データ総数を10240個に設定した。

### 3. 実験結果とその考察

#### 3.1 検出弾性波に及ぼす露出ボルト長さの影響(実験-I)

##### (1) 検出波形

図-5(a)~(c)は、ロックボルトの全長が

1m, ボルト周囲がコンクリートによって完全に充填されている試験体で、露出ボルト長さがそれぞれ5, 10および15cmに設定されている場合に検出された検出加速度波形を示したものである。まず、露出ボルト長さが5cmの場合の加速度波形（図-5(a)参照）に注目すると、検出波形には基本周期約100 $\mu$ s（周波数：10kHz）の連続波形が含まれているのが観察されるが、弾性波入力後500 $\mu$ s前後でその基本周期が局所的に乱れている位置があるのがわかる。いま、この基本周期が乱れている位置と弾性波入力点との時間差を求めてみると435 $\mu$ sとなり、この

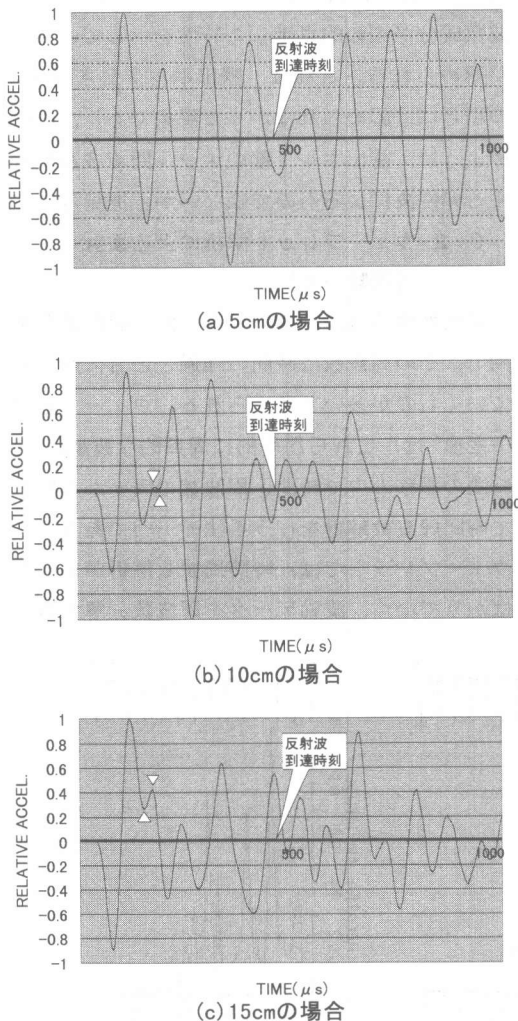


図-5 検出加速度波形に及ぼす露出ロックボルト長さの影響(長さ：1.0m、完全充填)

時間差を衝撃弾性波が長さ1mのロックボルトを往復するのに要する時間と仮定すると、ロックボルト中を伝播する衝撃弾性波の伝播速度は約4600m/sとなる。この値は、PC床板のグラウト充填性評価の際に筆者らが測定したPC鋼棒中を伝播する衝撃弾性波の伝播速度（4550m/s）とほぼ一致する。次に、露出ボルト長さが10および15cmの場合の加速度波形（図-5(b)および(c)参照）に注目してみると、これらの場合についても基本周期約100 $\mu$ sの波形が観察されるが、露出ボルト長さが5cmの場合とは異なり、弾性波入力後200 $\mu$ s近傍の位置で波形が局所的に乱れているのが認められる。この局所的な波形の乱れ部（図中の▽△部参照）の周期を調べてみると、露出ボルト長さが10および15cmの場合に、それぞれ約16および35 $\mu$ sとなり、これをコンクリート未充填区間のボルト中を伝播する伝播速度5300m/sを用いて距離に換算すると、それぞれ約8.5および約18.6cmとなる。これらの数値は、図-6に示すナット間の距離（それぞれ4.1および9.1cm）を2倍した値とほぼ一致するため、検出波形で観察される局所的な乱れは、この区間で反射した弾性波に起因したものと推測される。なお、露出ボルト長

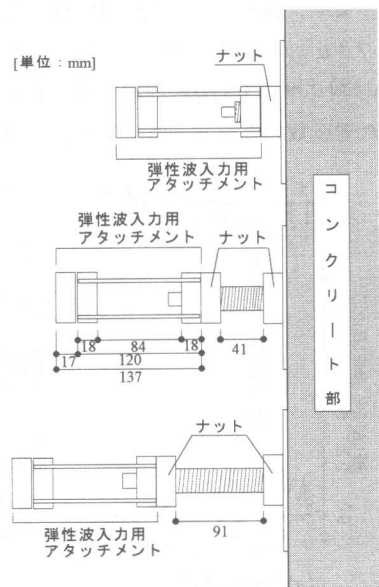


図-6 弾性波入力点近傍の詳細図

さが5cmの場合には、図-6に示すように、ナット同士が密着しているため、ナット間での反射波が観察されなかったものと考えられる。これらのことから、露出ボルト長さが長いほど、計測波形に雑音が入り易くなるといえる。

次に、紙数の関係で図には示していないが、筆者らが過去に測定したPC床板の完全グラウト未充填試験体の場合には、PC鋼棒端部からの反射波の検出は比較的容易であったが、ロックボルトの周囲をシース管で覆うことによって全長をコンクリート未充填とした試験体の場合には、ボルト端部からの反射波の確認が困難であることがわかった。この原因として、入力弾性波が減衰しないうちにボルト端部からの反射波が到達するため、反射波の確認が困難となっていることも考えられるが、その他として、ロックボルトではPC鋼棒のような緊張力が導入されていないため、アンカープレート部やナット部などで緩みが生じ、これらの緩みに起因した雑音が計測時に発生していることなどが挙げられる。

## (2) 周波数特性

図-7(a)~(c)は、前掲の図-5(a)~(c)に示した波形の周波数特性を示したものである。まず、露出ボルト長さが5cmの場合は、図-7(a)から明らかなように、基本周期100 $\mu$ sに対応する10kHzの周波数成分が著しく卓越した周波数特性を示しているが、それ以外に

約2.3kHz間隔で出現する卓越周波数間隔も同時に観察される。この2.3kHzの周波数は、伝播速度4600m/sを用いて距離に換算すると2.0mとなり、ロックボルトの全長(1.0m)を2倍した値と一致する。なお、10kHzの周波数は、伝播速度を用いて距離に換算すると23cmとなるが、これが何に起因した値なのかは現在のところ不明である。また、図-7(b)および(c)によれば、露出ボルト長さが10および15cmの場合についてもロックボルトの全長に対応した卓越周波数間隔が確認できるが、露出ボルト長さが10および15cmの場合には、約10kHzの周波数成分以外にも約2, 6, 9, 14および16kHz近傍の周波数成分が比較的卓越した特性を示しているのが認められる。これは、露出ボルト長さが5cmの場合には認められなかった現象であり、前述のように、露出ボルト部のナット間で多重反射する弾性波によるものではないかと推測される。

## 3.2 ウェーブレット解析による検討

### (実験-II)

検出弾性波は、一般的に局所的に周期的な波動で、その周波数は時間の経過とともに変化していくものが多いと考えられる。ウェーブレット変換<sup>4)</sup>は、これら局所的に周期的な波動 $f(x)$ を時間の推移の中で時間と周波数の両面から捉えて時間周波数解析を行う手法の一つであるが、ウェーブレットでは、時間周波数解析ができるばかりでなく、波動データを周波数分解するこ

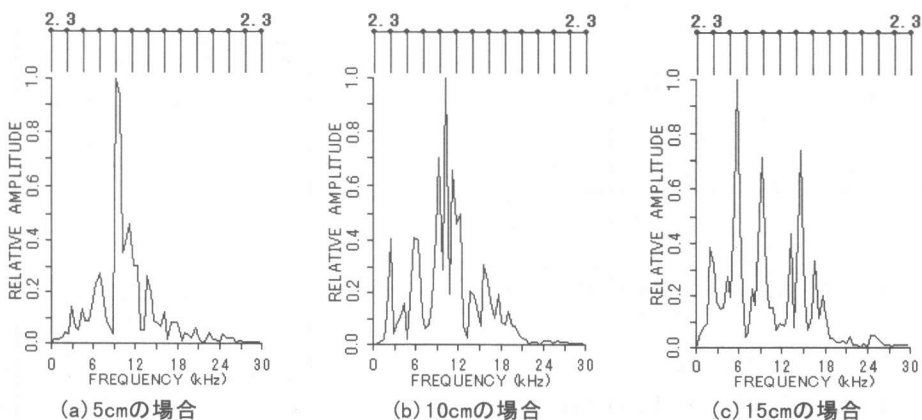


図-7 周波数特性に及ぼす露出ロックボルト影響(ロックボルト長さ:1.0m、完全充填)

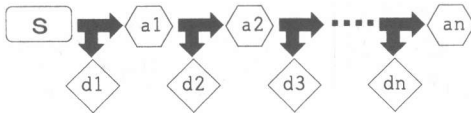


図-8 ウェーブレット分解ツリー  
(Level nの場合)

とも可能である。すなわち、ウェーブレットは、衝撃弾性波法で対象としている反射波のような非定常波動の検出に威力を発揮し、雑音などの高周波成分の除去、波形の分離や再構成が可能であるなどの特徴を有している。図-8は、ウェーブレット分解ツリーを示したものであるが、ウェーブレット分解により、原波形 $s$ はまずレベル1の近似 (approximation)  $a_1$ と詳細 (detail)  $d_1$ に分離され、その後これらの操作が高周波数レベルから指定されたレベル $n$ まで繰り返される。したがって、原波形 $s$ とレベル $n$ までの近似と詳細との間には、式(1)が成立する。

$$s = a_n + d_n + d_{n-1} + \dots + d_3 + d_2 + d_1 \quad (1)$$

図-9および図-10は、ロックボルト長さが3mの完全未充填試験体において、それぞれ前掲の図-4に示すアタッチメントを未使用および使用して弾性波を入力した場合に検出された加速度波形に対してウェーブレット解析を施した例である。なお、ウェーブレット関数としては、Daubechiesの $N=6$ のウェーブレット<sup>4)</sup>を用いてレベル7までの分解を行った。このウェーブレット解析により、原波形 $s$ は、高周波数成分から $d_1 \sim a_7$ の範囲で $d_1$ :約370kHz以上、 $d_2$ :約195~370kHz、 $d_3$ :約100~195kHz、 $d_4$ :約55~100kHz、 $d_5$ :約29~55kHz、 $d_6$ :約15~29kHz、 $d_7$ :約10~15kHzおよび $a_7$ :約10kHz以下の周波数成分の波形にそれぞれ分解される。

まず、図-9に示したアタッチメント未使用の場合に注目してみると、計測された原波形 $s$ においても弾性波入力後約1300 $\mu$ sの時点で反射波の到達が確認できるが、この波形をウェーブレット解析すると、レベル6の $d_6$ (約15~29kHzの周波数成分)のように特定の周波数成分を抽出することによって、検出の対象とする入力波および反射波が更に明確に捉えられるようにな

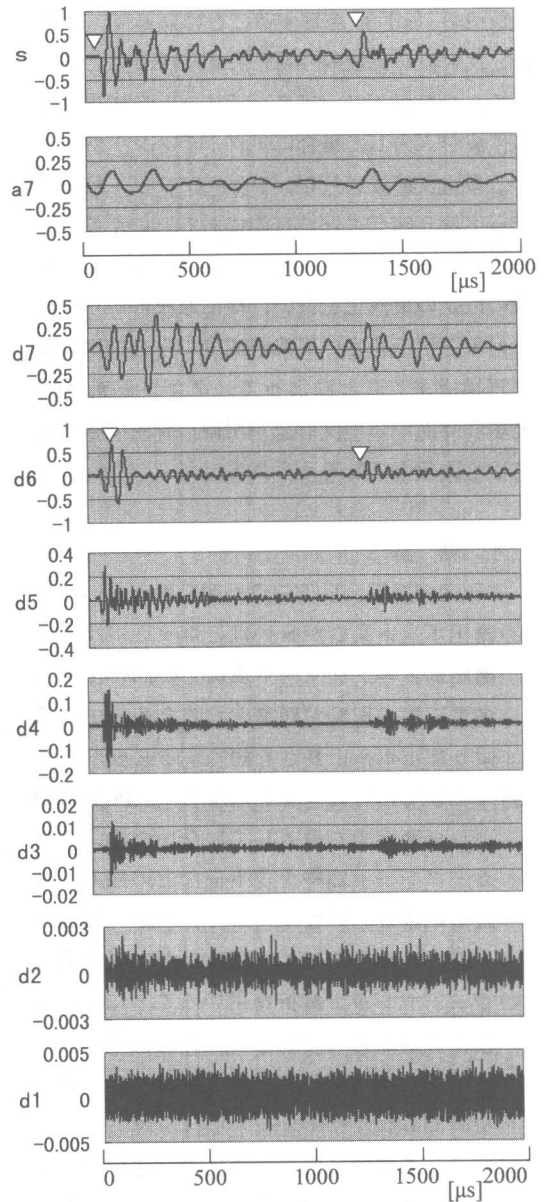


図-9 ウェーブレット解析された加速度波形  
(長さ: 3m、完全未充填、アタッチメント無)

ることがわかる。

次に、図-10に示したアタッチメントを用いた場合の結果に注目してみると、原波形 $s$ に関しては、アタッチメント未使用時の検出弾性波と比較して著しく波形が乱れており、反射波の確認が困難となっているのがわかる。しかし、この波形に対してウェーブレット解析を行うと、図-10から明らかなように、約10kHz以下の周

波数成分 (a7) に着目することによって、入力波と反射波が比較的容易に特定できることがわかる。したがって、アタッチメントを使用して弾性波を入力した場合にアタッチメント内で生じる多重反射波成分を、ウェーブレット解析によって取り除くことが可能であるといえる。さらに、ウェーブレット解析の際に必要なレベル数の設定の最適化を行い、検出原波形から検出の対象とする特定の周波数成分のみを抽出および再構成することによって、グラウト充填/未充填境界面からの反射波が明確に特定できる可能性もあるものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究の結果、以下の点が明らかとなった。

- 1) 露出ボルト長さが長いほどロックボルトの露出部とコンクリート表面との間で生じる多重反射の影響が顕著となるため、できる限り露出ボルト長さを短くする必要がある。
- 2) 本実験で用いたロックボルトにはPC鋼棒のような緊張力を導入していないため、アンカープレート部やナット部などの緩みに起因した雑音の影響が著しく、衝撃弾性波の入力・検出方法について改良が必要である。
- 3) ウェーブレット解析を用いることによって検出の対象としている特定の周波数成分の波形を時系列データのまま抽出することが可能である。
- 4) 今後、衝撃弾性波法に対するウェーブレット解析手順の詳細が標準化できれば、施工品質の推定精度を向上できる可能性がある。

#### 参考文献

- 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
- 2) 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，

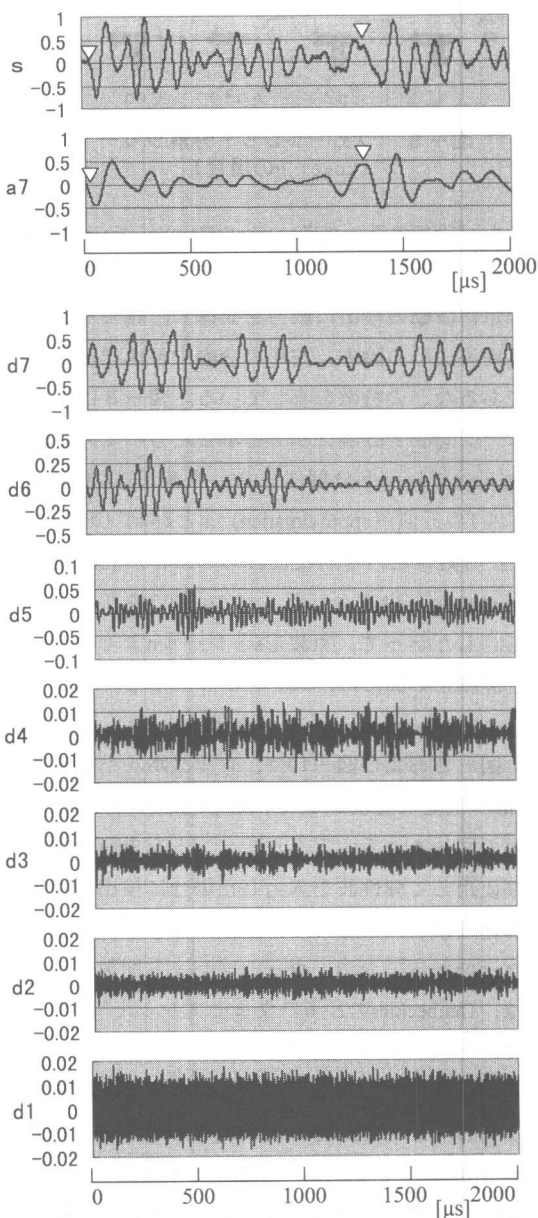


図-10 ウェーブレット解析された加速度波形  
(長さ：3m、完全未充填、アタッチメント有)

No.48, pp.268-273, 1994

- 3) 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
- 4) 榊原 進：ウェーブレットヒギナスガイド，東京電機大学出版局，223pp.，1996