

論文 衝撃弾性波法を適用したロックボルトの非破壊評価に関する基礎的研究

高村大*¹・山田和夫*²・松元香保里*³

要旨:本研究では、ウェーブレット解析、周波数特性およびエネルギー変化率に着目した衝撃弾性波法によるロックボルトの施工品質評価の適用性を相互に比較検討した。その結果、反射波が比較的明瞭に検出されている場合には、ウェーブレット解析が最も直接的で適しているが、検出波形の観察では反射波の確認が困難な場合には、検出波形の卓越周波数間隔や卓越エネルギー変化率に着目した評価方法の方が適していること、各種特性値を算定する際、検出波形をウェーブレット分解および再構築して必要な周波数領域の波形データに変換すると対象とする反射波がより明確となること、などが明らかとなった。

キーワード:衝撃弾性波法、ロックボルト、充填評価、ウェーブレット解析、周波数特性

1. はじめに

筆者らは、従来から衝撃弾性波法を適用したコンクリートの非破壊試験方法の確立を目的として、コンクリート内部の鉄筋腐食評価¹⁾、コンクリート基礎杭の施工品質評価²⁾、PC床板のグラウト充填性評価³⁾への適用性について一連の検討を行い、これまでに検出波形の時系列データ³⁾、周波数特性⁴⁾およびエネルギー変化量⁵⁾に着目した評価方法の提案を行った。また、別報⁶⁾では、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手法の適用性についても検討を行った。本研究では、引き続き非破壊評価の対象として最近その必要性が叫ばれているトンネルロックボルトの施工品質評価を取り上げ、検出された衝撃弾性波のウェーブレット解析、周波数特性およびエネルギー変化量に着目したロックボルトの長さおよび充填性評価の可能性について相互に比較検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本実験では、表-1および図-1に示すように、長さ3mのロックボルト(D25異形棒鋼)が

完全充填、完全未充填、並びに未充填区間が手前0.5m、先端0.5m、手前1.0m、中央1.0m、先端1.0m、手前2.0m、先端2.0m(φ38mmのシース管で未充填部を確保)に設定されている寸法

表-1 実験の概要

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

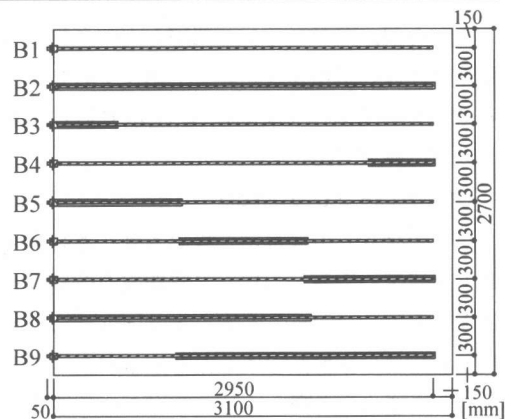


図-1 試験体の形状・寸法

*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)

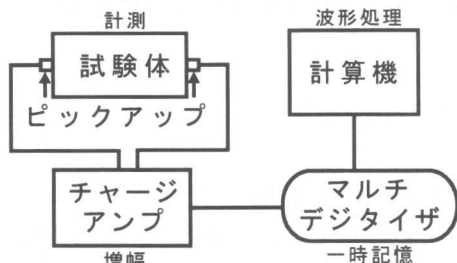


図-2 計測ブロック図

3,100(長さ)×2,700(幅)×300(厚さ)mmのモデル試験体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。

2.2 計測方法

本実験で用いた計測システムのブロック図を図-2に示す。計測に際しては、図-3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、アタッチメント頭部を超硬チップ付自動ポンチおよび鋼製ハンマーを用いて打撃することによって衝撃弾性波を入力し、ロックボルト端部にビニールテープで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(PV-91型)を用いて加速度波形を計測した。計測された加速度波形は、まずチャージアンプで増幅した後、マルチデジタイザに一時記憶させ、その後に計算機に転送して波形データの記録および後述する各種の波形処理を行った。なお、サンプリング間隔とデータ総数は、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、それぞれ1.0μsおよび8,192個とした。

2.3 処理方法

(1) ウェーブレット解析

ウェーブレット変換は、検出された波動を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ため、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対して威力を発揮し、雑音などの高周波成分の除去、波形の分離や再構成などが可能であるという特徴を有している。図-4は、ウェーブレット分解ツリーを示したもので、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 a_1

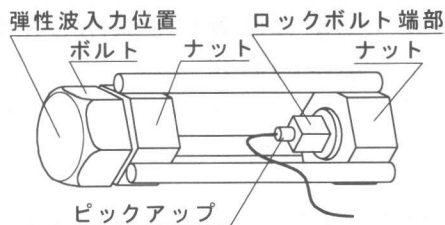


図-3 弾性波入力用アタッチメント

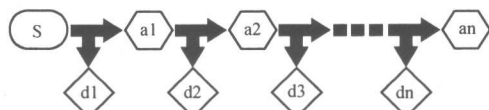


図-4 ウェーブレット分解ツリー

と詳細 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)が成立し、原波形は時系列データのまま幾つかの周波数領域のデータに分解されることになる。

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

なお、本研究では、分解周波数レベルと解析時間との関係を考慮して、ウェーブレット関数として $N=6$ のDaubechiesを使用し、レベル7までの分解を行って衝撃弾性波法に対するウェーブレット解析手法の適用性について検討した。

(2) 周波数特性

本研究では、検出された衝撃弾性波の卓越周波数間隔に着目して測定の対象とする反射波の到達時間を算定する方法について検討した。なお、周波数特性を調べる波形データとしては、使用した加速度ピックアップの性能を考慮してウェーブレット分解された d_i および a_i 成分を再構築した波形データ(約8kHz以下)を用いた。

(3) エネルギー特性

本研究では、まず検出波形の初動部を基準にして検出データを幾つかの区間データに分割して各分割波動データのエネルギー量(E_{gi})を算定し、得られたエネルギー量の変化状況から対象とする反射波の到達時間を算定する方法について検討した。なお、エネルギー量に関する

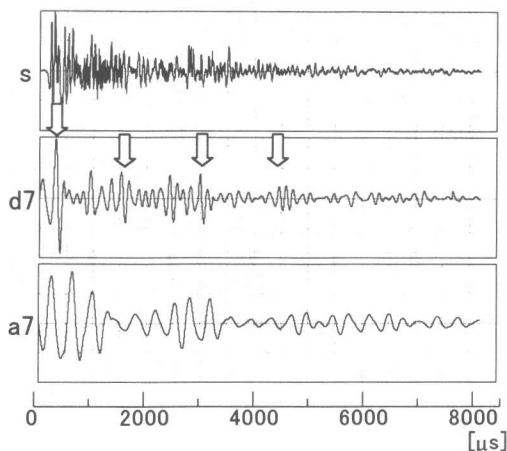


図-5 ウェーブレット解析結果(完全充填)
[入力手段:自動ポンチ]

解析パラメータとしては、式(2)で定義されるエネルギー変化率(ΔE_{gi})を用いた。

$$\Delta E_{gi} = (E_{gi} - E_{gi-1}) / E_{gi-1} \quad \dots\dots (2)$$

3. 解析方法

本研究では、実験結果との比較を行うために、別報⁴⁾と同様の2次元周波数応答解析を行った。本解析では、速度比例型の減衰項を有する波動方程式を採用し、減衰マトリックス[C]としては、 $\alpha[M] + \beta[K]$ で表される比例減衰(ここに、[M]:質量マトリックス、[K]:剛性マトリックス。ただし、便宜的に $\alpha=1 \times 10^{-7}$ および $\beta=5 \times 10^{-4}$ とした⁴⁾)を用いた。なお、周波数応答解析に際しては、周波数増分を0.01kHzに設定して15kHzまでの解析を行った。

4. 結果とその考察

4.1 ウェーブレット解析による充填性評価

図-5および図-6は、それぞれ自動ポンチおよび鋼製ハンマーを用いて衝撃弾性波を入力した場合の結果を完全充填試験体について示したものである。これらの図によれば、自動ポンチを用いた場合には、衝撃弾性波の入力エネルギー量が大きく、かつ打撃ごとの変動が小さいため、検出された波形は安定しており、ロックボルト終端からの反射波も3次と思われる波(左から3番目の矢印位置)まで確認すること

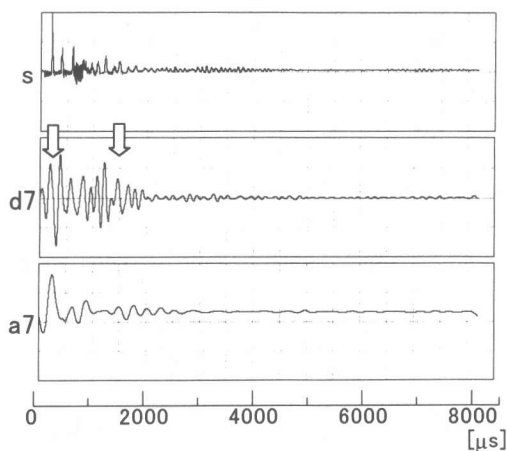


図-6 ウェーブレット解析結果(完全充填)
[入力手段:鋼製ハンマー]

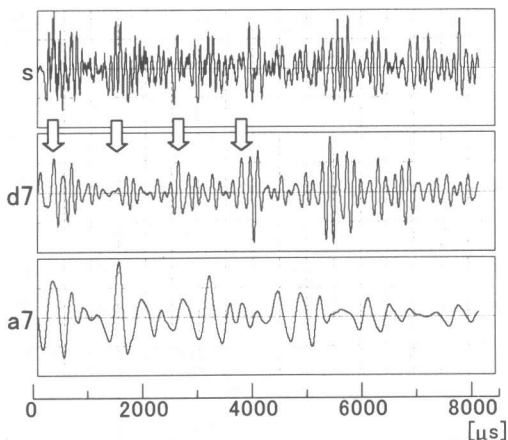


図-7 ウェーブレット解析結果(完全未充填)

ができるが、鋼製ハンマーを用いた場合には、衝撃弾性波入力直後に検出波形は急速に減衰しており、反射波(左から2番目の矢印位置)の確認が難しくなっているのがわかる。そのため、以下では、自動ポンチを用いて衝撃弾性波を入力した場合の結果について述べることにする。

図-7は、完全未充填試験体に対する結果を示したものである。図によれば、いずれの波形も反射波の到達時点近傍で波形の増幅傾向が確認できるが、波形の増幅傾向は、低周波数成分の波形ほど顕著であることがわかる。これは、 $s \sim d_6$ (約8kHz以上)までの範囲の波形には、使用した加速度ピックアップの信頼領域を超える周波数成分が含まれているためと思われる。

図-8は、中央1.0mの区間が未充填の試験体

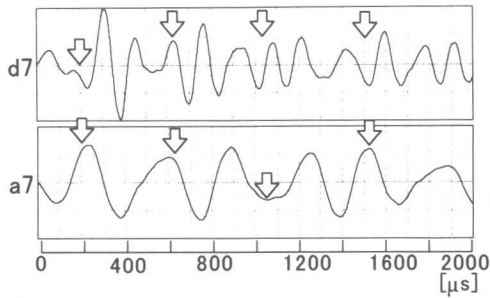
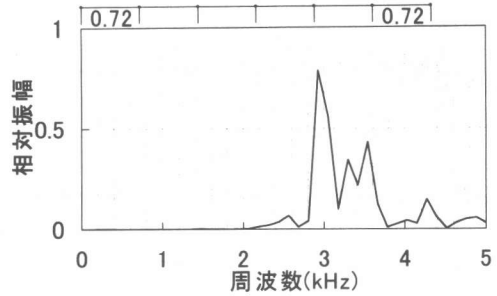


図-8 ウェーブレット解析結果
(中央1.0m未充填)

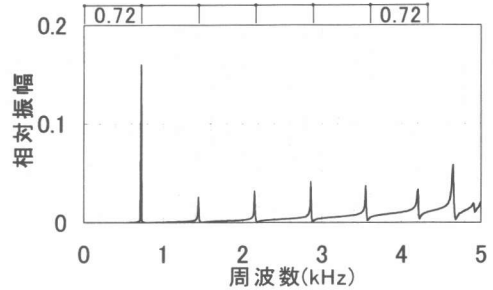
に対する結果を時間軸を2,000 μ sまでの範囲で示したものである。ただし、図中の矢印は、左から順に衝撃弾性波の入力時、充填／未充填境界、未充填／充填境界およびロックボルト終端からの反射波到達時であることを示している。図によれば、約3～8kHzの範囲の周波数成分の波形(d7)では、上記の各境界からの反射波到達時点以外にも波形の増幅現象が認められるため、波形の観察のみから反射波を特定するのは困難であるが、約3kHz以下の周波数成分を有するa7に注目すると、基本周波数約3kHz(周期: 333 μ s)の規則的な波形が各境界からの反射波到達時点近傍になると乱されているのが認められる。このことから、周波数成分を更に絞り込むことによって、ロックボルト終端からだけでなく各種境界からの反射波も明確に抽出できる可能性があるといえる。

4.2 周波数特性に着目した充填性評価

図-9(a)および(b)は、それぞれ原波形のウェーブレット解析によって得られたd7およびa7成分を再構築した波形の周波数特性および2次元周波数応答解析結果を完全充填試験体について示したものである。なお、図中の0.72kHz毎に記した間隔は、ロックボルト終端からの反射波の到達時間から算定される周波数間隔であるが、図-9(b)に示した周波数応答解析結果によれば、5次までの範囲において正確に0.72kHz間隔で卓越する周波数成分が確認できる。また、実験結果(図-9(a)参照)によれば、終端からの反射波に対応する卓越周波数間



(a)実験結果



(b)解析結果

図-9 周波数特性(完全充填)

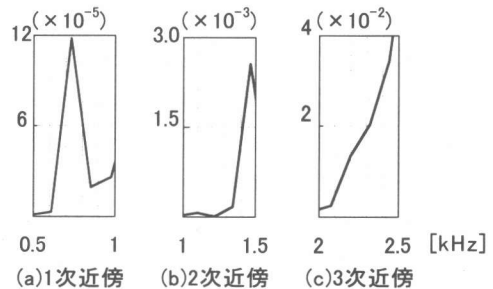
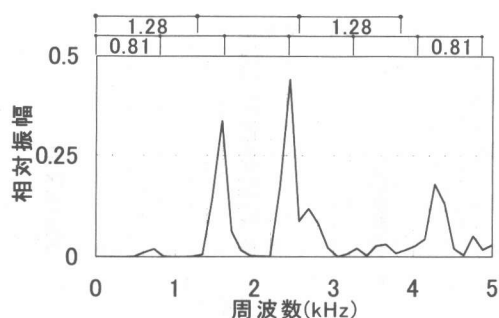


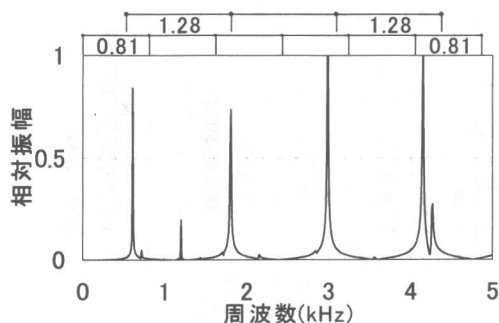
図-10 上記の図-9(a)の部分的拡大図

隔が明確に確認できるが、4次の卓越周波数成分が著しく卓越しているため、1～3次の卓越周波数成分の確認が困難である。ただし、縦軸を拡大した図-10から明らかなように、相対振幅値は極めて小さいものの、1および2次に相当する0.72および1.44kHzの位置で卓越する周波数成分が確認できる。なお、3次に相当する2.16kHzの位置では明確には卓越周波数成分が確認できないが、これはおそらくフーリエ振幅値が求まる周波数間隔(本実験では、サンプリング個数と間隔をそれぞれ8,192個と1.0 μ sとしているため、 $\Delta f = 1/(8,192 \times 1.0\mu s) \approx 0.12$ kHzとなる)が粗かったためではないと思われる。

図-11および図-12は、それぞれ手前および



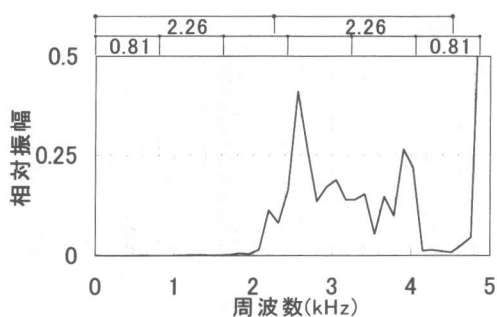
(a)実験結果



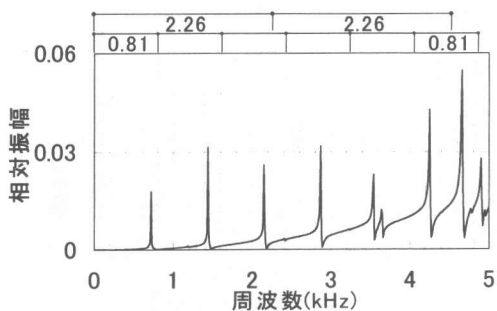
(b)解析結果

図-11 周波数特性(手前2.0m未充填)

先端の2.0mの区間が未充填となっている試験体に対する結果を示したものである。まず、手前2.0mの区間が未充填となっている試験体に注目すると、図-11(b)に示した解析結果によれば、手前2.0mの未充填/充填境界からの反射波に対応する周波数間隔(約1.28kHz)で著しく卓越した周波数特性を示しており、ロックボルト終端からの反射波の到達時間に対応する周波数では、明確な卓越現象は認められないが、図-11(a)に示した実験結果によれば、逆に未充填/充填境界からの反射波よりもロックボルト終端からの反射波に対応する周波数間隔(約0.81kHz)で卓越する周波数特性を示しているのがわかる。これに対して、先端2.0mの区間が未充填となっている試験体の場合の解析結果は、図-12(b)に示すように、ロックボルト終端からの反射波に対応する周波数間隔で卓越した特性を示しており、手前1.0mの充填/未充填境界からの反射波に対応する周波数(約2.26kHz)成分は明確には認められないが、図-12(a)に示した実験結果の場合には、2.2~2.5kHzと約



(a)実験結果



(b)解析結果

図-12 周波数特性(先端2.0m未充填)

4.8kHzの成分が著しく卓越した周波数特性となっており、解析結果では明確ではなかった手前1.0mの充填/未充填境界からの反射波に対応する周波数成分が卓越しているのがわかる。

以上のように、検出し易い反射波の種類は、実験結果と解析結果とで異なっているが、得られた周波数特性、特に規則的に出現する卓越周波数間隔からロックボルトの未充填状況を評価することが可能であるといえる。

4.3 エネルギー変化に着目した充填性評価

図-13(a)~(d)は、それぞれ完全充填、完全未充填、手前2.0mおよび先端2.0mの区間が未充填状態に設定されている試験体によって得られたエネルギー変化率と衝撃弾性波の伝播距離との関係を示したものである。ただし、縦軸のエネルギー変化率は、ロックボルト終端からの反射波が2回到達するまで(伝播距離:6m)の間に観察された最大エネルギー変化率で除して無次元化してある。これらの図によれば、いずれの試験体も抽出フィルターとして相対エネルギー変化率0.2を設定することによって、ロ

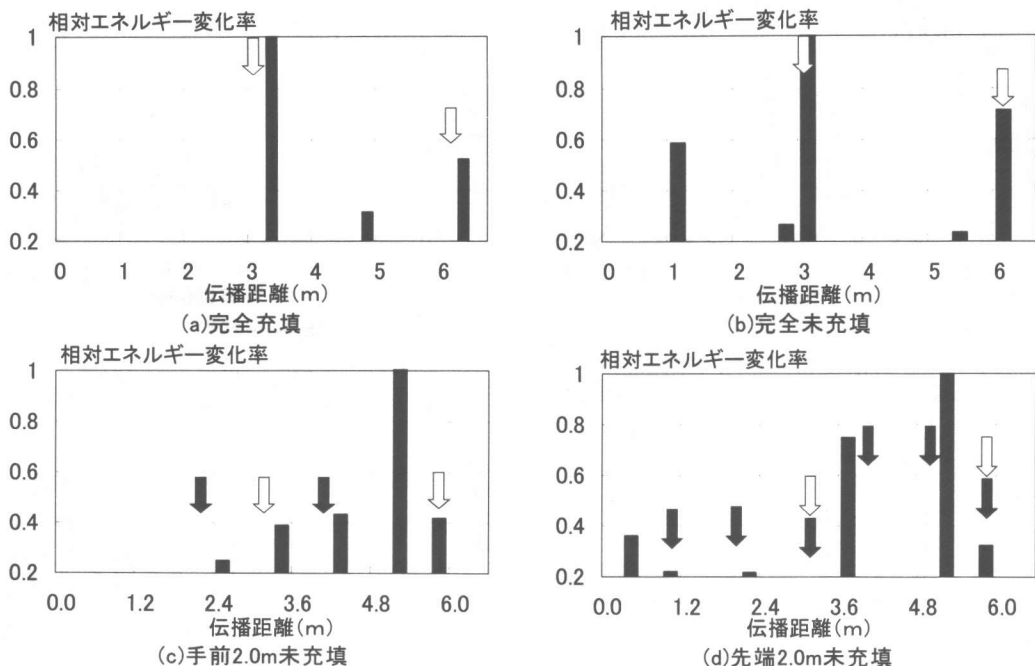


図-13 エネルギー変化率特性

ックボルト終端からの反射波（白色の矢印），充填/未充填および未充填/充填境界からの反射波（黒色の矢印）に対応する信号を明確に検出できているのがわかる。なお，紙数の関係で図には示していないが，他の試験体でも同様の結果が得られた。

5. 結論

本研究の結果，以下の点が明らかになった。

- 1) 本研究で採用した自動ポンチによる衝撃弾性波の入力方法は，入力エネルギーが大きく，入力弾性波も安定しているため，衝撃弾性波の入力方法として適している。
- 2) ウェーブレット解析を適用して特定の周波数成分の時系列データを抽出することにより，各種反射波の抽出が容易となる。
- 3) 周波数特性に着目した評価方法では，あらかじめウェーブレット解析により信頼性の低い高周波数成分を取り除くことによって，各種境界からの反射波に対応する卓越周波数間隔が確認し易くなる。
- 4) エネルギー変化率に着目した評価方法では，

適切なフィルターを設定すると，各種境界からの反射波の確認が容易となる。

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，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) 黒野幸弘，山田和夫，中井裕司：PC床板の周波数応答に及ぼすグラウト充填状況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.50，pp.880-885，1996
- 5) 永田智宏，山田和夫，松元香保里：検出弾性波のエネルギー変化に着目したグラウト充填性評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.281-286，1998
- 6) 永田智宏，山田和夫，松元香保里，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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1249-1254，1999