老朽化 PC 管路の非破壊モニタリングに基づく漏水現象評価

Evaluation of Water-Leakage Phenomena in Deteriorated PC Pipeline Based on Non-Destructive Monitoring

鈴木哲也^{*} 大津政康^{**} 青木正雄^{***} 中村良太^{****} Tetsuya Suzuki, Masayasu Ohtsu, Masao Aoki, Ryota Nakamura

*博士(工学),日本大学専任助手,生物資源科学部生物環境工学科(〒252-8510 神奈川県藤沢市亀井野1866)
**工博,熊本大学大学院教授,自然科学研究科(〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2丁目39番1号)
***博士(農学),日本大学助教授,生物資源科学部生物環境工学科(〒252-8510 神奈川県藤沢市亀井野1866)
****農博,日本大学教授,生物資源科学部生物環境工学科(〒252-8510 神奈川県藤沢市亀井野1866)

Deterioration of existing PC pipeline systems could result in water leakage or dropping of pressure. In most cases, such non-destructive tests as a water leak detection method or a ground probing radar method are applied to identify leakage location in pipeline. Although these methods are effective for evaluation of limited sections, further technical improvement is necessary for wide-range and long-term measurements for maintenance of the existing pipelines. In this study, water-leak evaluation by Acoustic emission (AE) method and the material physical properties evaluation have been conducted at the existing PC pipeline. AE behaviors at leaked section of the pipeline are different from those of sound portion. AE activity in water-leak section is high, and water leak and environmental noise can be distinguished by AE parameter analysis. A relation between AE rate and inner water pressure is analyzed by the rate process theory. It is realized that AE activity is closely associated with to water leakage in water-leakaged pipeline.

Key words: PC Pipeline, Acoustic Emission, Non-Destructive Tests, Water-Leak

1. はじめに

上水道施設などの内水圧を利用した送配水システムで は、遠隔操作による通水量の集中管理が一般的である.し かし、施設の老朽化に伴う不具合は、管理過程で発見され るよりも末端での圧力低下や漏水に伴う地表面の陥没、地 震動による損傷などにより顕在化することが多い.長期間 供用された配管施設では、損傷の蓄積に伴う材質劣化に加 えて、制水弁や排泥工、空気弁などの付帯施設の機能低下 に伴い送水制御が困難になっている事例が散見される ^{1),2),3)}.加えて、一般の土木構造物と比較して地中に埋設 されている構造的特色から、不具合が早期に発見されるこ とは少なく,損傷が進行した時点で明らかになることが多い.このような背景から既存施設の維持管理には,漏水事 故を事前に防止するための非破壊モニタリング技術の開 発が急務となっている.現状の問題点は,数十年単位で供 用された既存施設を対象とした漏水現象の非破壊による 探知技術の開発が遅れていることにある.

本研究では,敷設後36年経過し漏水が確認されている PC 管路を用いて漏水現象の非破壊モニタリングをAE

(Acoustic Emission ;AE) 法で試みた結果を報告する.計 測結果は,AE パラメータ解析により定量化を試みると共 に,環境ノイズと漏水現象との分離方法を検討し,AE 法 による実構造物の漏水探知技術の開発を試みる.



写真-1 継手部からの漏水状況



図-1 PC 管の構造概要

2. 試験地区の概要

現地計測を行った配管施設は,畑作営農を中心とした農 業地帯に立地し,調査時点で敷設後 36 年経過した大規模 農業用配管施設である.

施設規模は、総延長 52km のクローズドタイプパイプラ イン(管径 φ 350~1,350mm)で、昭和 42 年から 2 年間と いう短期間で施工されている.

管種構成は、管径 φ 500 mm以上では主に遠心力鉄筋コン
クリート管(RC 管)とコア式プレストレストコンクリー
ト管(PC 管)が、 φ 450 mm以下では水道用石綿セメント管
(ACP)が使用されている.また、加圧区間では鋼管(SP)
が使用されている.

本施設の36年間における漏水事故は,年平均2.6件発 生しており,路線の一部区間ではダクタイル鋳鉄管(DCIP) による改修工事が行われている.漏水事故は,コンクリー ト管(PC管, RC管, ACP)の継手部において多発してい るが,現在まで危険部位の全面改修などの抜本的な対策は 取られていない.継手部で発生した漏水事故状況を**写真-1**



写真-2 管本体での漏水事故状況

に、管本体での状況を写真-2に示す.

3. PC 管の構造的特色と材質評価

新設 PC 管の耐久性は、JIS A 5333 に規定されている内 圧試験や外圧試験により評価される.新設管の施工は、設 計段階で構造解析と水理解析から外圧と内水圧を評価さ れる.しかし、敷設後数十年経過した施設では、新設時と は異なり,管体が自動車荷重や地盤の不等沈下などの物理 的影響を受けている可能性が高い.加えて、地下水や土壌 による化学的影響を受けて材質劣化が進行するものと考 えられる. 適切な維持管理には、これらの物理的ないし化 学的影響を受けた管体の損傷度を定量的に評価する必要 があるが, 土中に埋設された条件下では, 上記, 内圧試験 や外圧試験を行なうことは困難である.通常,これらの試 験は、敷設替工事に伴う撤去管を用いて JIS 規格に準じた 試験が行われることもあるが,供試できるサンプル数が限 られるなど、路線全体を評価するには試験値の取り扱いに 検討が必要である.このことから,既設 PC 管路の材質評 価には構造的特色を踏まえた調査手法を検討する必要が ある.

PC 管の構造は、コンクリート管の長さ方向に PC 鋼棒ま たは PC 鋼線を配置し、プレテンション方式によりプレス トレスを導入した後に、円周方向に PC 鋼線を緊張しなが ら巻き付けてプレストレス (ポストテンション)を導入す る. この PC 鋼線には厚さ 2cm 程度のカバーコートモルタ ルを吹き付けることにより外部環境から PC 鋼線を保護し ている. 図 - 1 に PC 管の構造概要を示す. PC 管の材質劣化は、漏水事故により顕在化するが、漏 水現象は継手部または管本体から発生する.本研究で供試 した配管施設では、漏水事故の 70%が継手部からであり、 20%が管体、10%が付帯工であった. PC 管のみでは、47 件(全漏水事故件数の 50%)のうち 85%にあたる 40 件が 継手部からの漏水であり、のこり7件が管体からであった. 継手部の漏水事故では、ゴム輪の「抜け出し」や「切断」 が確認されたことから、継手ゴム輪の劣化が主因であると 考えられる. 管本体では、PC 鋼線の腐食がいずれの事故 管においても確認されていることから、カバーコートモル タルの劣化による土中水の浸透が PC 鋼線の腐食を引き起 こし、漏水事故の誘因になったと考えられる.

これらのことから,既設 PC 管路の材質評価には,カバ ーコートモルタルの採取に伴う PC 鋼線の腐食度の確認と 継手ゴム輪の物性試験により水密性能の低下を類推する ことができるものと考えられる.

したがって,配管施設での非破壊 AE モニタリングは, 継手ゴム輪の劣化や管体の耐荷性の低下により発生する 漏水現象の弾性波(漏水波)を検出し,その特性を評価す ることになる.

4. 漏水現象の非破壊モニタリング

漏水現象は,管体の材質劣化や自動車走行,地震動によ る物理的損傷が進行した結果として発生する.代表的な調 査手法として漏水箇所の探知や漏水量調査により原因部 位の特定により,定量的ないし定性的な評価が行なわれて いる.管内に調査者が入ることができる場合やカメラ設備 を投入できるマンホールが設置されている場合は,目視調 査や継手部の止水性能を試験するためのテストバンドに よる継目試験が行なわれることもある.

既存の調査手法では、漏水探知を除き、制水弁による止 水や排泥工からの排水が調査に不可欠な条件となる.しか し、調査対象施設の老朽化が進行していると制水弁の止水 性に問題がある場合が多く、閉切り性能が確保できずに管 内を空虚にすることが困難になる.つまり、老朽化が進行 した施設ほど、上記調査手法の適用が困難になる.一方、 漏水探知は、既存施設の操作を必要としないことから短期 間において一定路線を調査するには有効である.しかし、 本手法では、漏水の判断を人間の聴覚に依存していること から、20kHz 以上の周波数領域の漏水現象を捉えることが できないことや、長期の計測が不可能であることなど克服 すべき課題もある.

以上のことから,老朽化の進行した配管施設の漏水現象 を計測するには,以下の4点の課題を克服する技術の開発 が必要であるものと考えられる.

- (1) 既存施設の止水・排水操作を必要としない.
- (2) 長期間,同一位置での定点観測が可能.
- (3) 各種漏水規模(広域周波数帯)に適用できる計測.
- (4) 漏水現象と環境ノイズ(自動車の走行音等)とを区別できる解析パラメータの活用.

本研究では、AE法により上記(1)~(4)の課題を考慮し、 漏水現象の非破壊モニタリングを試みた.

5. 既設 PC 管の管材試験と材質評価

5.1 試験方法

(1) PC 管カバーコートモルタルの採取および試験方法

供試体は,複数のPC管からカバーコートモルタルを40 箇所および継手ゴム輪を15箇所採取した.採取部位での 内水圧は0.17~0.54MPaである.

管体の敷設条件は、地下水はなく、黒ボク土壌下約2.0m の部位である. 土壌条件は、土性LiC、密度2.42(g/cm³)、 pH(H₂O₂) 6.7 である.

採取方法は、耕地下に埋設されている既設管に対して、 バックホウにより管体上部の土壌を堀上げ、表面部に深さ 2cm,幅4cm×4cmの切込みを入れてカバーコートモルタル を採取した. PC 鋼線の腐食は、廃棄管の場合、切断して カバーコートモルタルとともに採取して確認した.今後も 利用する路線では、切断せずに目視観察を行った.試料採 取後、サンプリング部は2液性固化材により補修し埋め戻 した.採取状況を写真-3に示す.

供試体の試験項目は、中性化試験と PC 鋼線の腐食状況 の目視観察である.中性化試験は 1%フェノールフタレイ ン溶液を塗布し、呈色反応から中性化深さを測定した.試 験後の供試体の概要を写真 - 4 に示す. PC 鋼線の腐食は、 目視により腐食状況の観察に加えて、廃棄管ではカバーコ



写真 - 3 PC 管カバーコートモルタル採取状況

表-1 カバーコートモルタルの中性化試験結果

項	目	試料	厚さ	中性化深さ	中性化率
			(mm)	(mm)	(%)
全	体	40	19.5(12-27)	3.9(1-15)	20.7
PC 屠	氦食	11	18.9(16-25)	5.7(3-15)	31.0
未腐	氰食	29	19.7(12-27)	3.2(1-6)	16.2

(*1) 中性化率= (中性化深さ)/(カバーコートモルタル厚)×100(%)

(*2) 数値は平均値(最小値-最大値)を示す.

ートモルタルを全て除去し, PC 鋼線の破断などの損傷の 有無を確認した.

(2) 継手ゴム輪の物性試験方法

継ぎ手ゴム輪は,既設管路の付け替え工事の際に発生す る廃棄管からサンプルを採取した.試験は,敷設当時のJIS 規格を準用し,物理試験(JIS K 6353-1960)によりゴム材 質を評価した.

5.2 PC 鋼線の腐食とカバーコートモルタルの中性化

カバーコートモルタルは,厚さが平均19.5mm(最大27mm, 最小12mm)であった.カバーコートモルタルの中性化試験 結果の概要を**表 - 1**に示す.

本研究に用いた PC 管の敷設当時の水セメント比は,管体:W/C=33%,カバーコートモルタル:W/C=21%であった³⁾. 平均中性化深さは 3.9mm で,平均中性化率は 20%程度である.しかし,中性化の進行した供試体では,未中性化領域が存在したとしても PC 鋼線の腐食が確認された. PC 鋼線が腐食した供試体では,カバーコートモルタルの中性化深さが PC 鋼線の腐食が無いものと比較して平均1.78 倍の進行が確認された.その際,中性化速度は 0.16mm/year (平均値)である.しかし,いずれの供試体も全域が中性化す



写真 - 4 PC 管カバーコートモルタル (試験後)

表-2 継手ゴム輪物性試験結果

項目	試験値	規格値
引張り強さ(kgf/cm ²)	117 (47-174)	90 以上
伸び(%)	380 (200-400)	400 以上
スプリング硬さ(度)	58 (50-60)	$45 \sim 60$
永久伸び(%)	4.2(切断-9.0)	15 以下
材質	天然ゴム	-

(*1) 数値は平均値(最小値-最大値)を示す.

ることはなく,数mmではあるが中性化残り(未中性化領域) が確認された.一般のコンクリート構造物の場合,1cm程 度の中性化残りで鉄筋の腐食が開始するとの指摘もある ことから⁴⁾,中性化の進行や内水圧による恒常的な引張り 力により,PC 鋼線の腐食が進行したものと考えられる. なお,表中の「全体」とは試料全体を示す.「PC腐食」と は PC 鋼線が腐食していた供試体のみのデータであり, 「未腐食」とはそれ以外のデータを集計したものである.

5.3 継手ゴム輪の物性試験結果

継手ゴム輪は,製造当時のJIS 規格に準じて物性試験を 行った.試験結果を表 - 2 に示す.物性試験の結果,継手 ゴム輪は,採取部位により変動が大きいことが分かった. 試験項目のうち「伸び」および「スプリング硬さ」が規格 値に抵触し,これ以外の試験項目は,ほぼ規格値を満足す る結果となった.

本試験結果から,敷設後長期間経過した PC 管ではゴム 輪の伸縮性または弾性の低下に起因する継手の水密性の 低下が漏水事故の一因であると考えられる.供試したゴム 輪の外観形状を写真 - 5 に示す.



写真-5 36年供試された継手ゴム輪の変質状況

6. 漏水現象の AE モニタリング

6.1 既設配管施設への AE 計測の応用

AE とは、固体内部の塑性変形あるいは同様なエネルギ 一解放過程において発生する弾性波動現象である⁵⁾.本手 法は、対象構造物から発生する弾性波を受信し、その AE 発生特性から対象構造物の損傷度を評価するものである. AE 法を配管施設に適用する場合、既存手法とは異なり、 施設の管理作業にかかわらず、管体から生ずる漏水などの AE 信号(弾性波動)を受信できることから、他の手法と 比較して技術的優位性は高いものと考えられる.管路施設 以外の適用例としては、既設橋梁の損傷度診断⁶⁾や工業用 水用タンク施設の漏水評価⁷⁾などがあり、各種の構造体で 実績が上げられている.

6.2 調査路線の概要

調査路線は,過年度に新設管 (PC 管)の標準許容漏水 量 Q=0.10~0.15m³/(d・cm・km)⁸⁾の約 10 倍にあたる Q=1.14m³/(d・cm・km)の漏水が確認され¹⁾,漏水部位もほほ 特定されている区間である.調査路線は,PC 管であり管 径 φ 500mm,総延長 L=1.1km である.現地計測は,AE 計測 に加えて,内水圧の計測を行った.AE 計測地点は,過年 度に確認されている漏水部位近傍での計測地点を「漏水 部」とし、竣工後漏水事故が発生していない部位を「通常 部」として行った.なお,本論では以後,両測定点を漏水 部ないし通常部と記載する.AE 計測の概要を図-2 に示 し,調査区間概要を図-3 に示す.

6.3 AE 計測部位および条件

計測は 30 分/回で行なった.計測項目は、AE ヒットと



図-2 AE モニタリング状況

内水圧である. 図 - 3 に示す(a) 漏水部および(b) 通常部に おいて既設配管の AE 発生挙動を計測した. 各地点の内水 圧は,漏水部で 0.43MPa,中間地点(図 - 3 中の内水圧計 測地点)で 0.44MPa である.通常部では,0.42MPa である. 計測装置は,漏水部で DISP - AE システム(PAC 社製)を, 通常部で MISTRUS - AE システム(PAC 社製)を用いた. 双方の計測条件は同一とした. AE 信号は,60dB で増幅し, しきい値を 38dB とした. センサは,共振型センサを用い, 管体表面の円周方向に等間隔に 4 箇所設置した.

6.4 計測結果および考察

(1) 漏水部と通常部の AE 発生挙動の比較

AE 計測の結果,検出された弾性波は,漏水部と通常部 で検出波形が異なっていた.漏水部では,図-4に示す波 形が検出され,周波数解析の結果,ピーク周波数 73kHz で あった.これに対して,通常部では,漏水部とは異なり自 動車走行時に車輌走行ノイズと考えられる AE が計測され た.図-5に検出波形を示す.検出波形は漏水部とは異な り21kHz であった.これは,漏水部で検出される AE が管 内水の流出に伴うと欠損と水との切裂き音であるのに対 して,通常部では車輌走行に起因する管体振動である点に 発生機構の相違がある.その結果,波形形状が大きく異な り,周波数特性の相違が確認されたものと考えられる.

これらの結果から,漏水起源のAEと自動車走行などに 起因するノイズとは,検出波形や周波数帯により区分でき る可能性が本計測から明らかになった.

そこで、内水圧と AE 発生挙動との関係を明らかにする

-770-



図-3 AE 計測を行った管路の概要



図 - 4 漏水部での検出 AE 波形

ために,計測対象区間の制水弁を全閉して計測を行なった. 制水弁の止水は,AE センサにより通水の有無を止水した 制水弁ごとに確認した(止水が十分でない場合は,通水音 がセンサへ伝搬される).

AE 発生頻度は、検出波形同様、漏水部と通常部で異な る傾向が確認された.内水圧は、全閉後 30 分間に 23%減 少し、0.44MPa から 0.34MPa まで低下した.漏水部での AE 発生挙動は、計測時間の経過(内水圧の低下)に伴い低下 する傾向が確認された.漏水部と通常部では明らかに AE 発生挙動が相違し、漏水部において図 - 4 に示す漏水音に 起因すると考えられる AE の頻発を確認した.通常部では、 計測時間を通して平均 1~2 ヒット/min で、変動は確認さ れなかった.計測結果を図 - 6,7 に示す.

内水圧が作用している既設配管施設の AE 発生挙動は, 管体の微小ひび割れの発生や漏水現象と対応しているも のと考えられる.これらの現象と関係する AE 発生挙動は, 内水圧の上昇に伴い累進的に増加するものと考えられる. この過程は確率過程論による取り扱いが可能であり,本研 究ではレートプロセス理論⁹⁰の適用を試みた.

AE 発生総数 N, 内水圧レベル Pの AE 発生確率関数を f(p)



図-5 自動車走行時の検出 AE 波形(通常部)

とすると, P から P+dP への内水圧増加に対して, 式(1) を得る.

$$f(p)dp = \frac{dN}{N} \tag{1}$$

検討結果を図 - 8 に示す.内水圧比は,最大内水圧 P_{max} に対する内水圧 P の比率を示す. P/Pmax=1.0 の場合,内 水圧が最大値であり, P/Pmax<1.0 では内水圧が低下してい ることを示す.解析の結果,漏水部では高内水圧下での AE 発生確率関数が通常部と比較して高くなる傾向が認め られた.これは,高内水圧での AE 発生頻度が高いことを 意味している.通常部では,AE 発生確率関数 f(p)が常に 0.04 以下を示し,内水圧の低下による相違は確認されなか った.

したがって、既設配管施設の AE 発生挙動は、レートプロセス理論によりを評価できる可能性が本計測結果から確認された.このことにより、内水圧の異なる路線間での比較が AE 発生確率関数と内水圧比(P/Pmax)の関係から検討できるものと考えられる.加えて、漏水現象により発生した AE の特性を把握することにより発生の有無等を評



図-6 AE モニタリング状況(漏水部)

価できるものと考えられる. 既報の研究では, AE モーメ ント・テンソル解析¹⁰⁾や次項で詳述する AE パラメータ解 析²⁾により,漏水起源の AE に関する特性解析の有効性が 検討されている.

(2) AE パラメータ解析

a) 概要

既設配管施設の漏水部が通常部と比較して AE 発生頻 度が高いことが明らかになった.しかし,大多数の配管施 設は道路下に埋設されている.この構造的特色を考慮する とAE発生頻度に加えて漏水が原因のAEと環境ノイズ(車 輌走行)との識別が必要となる.

そこで、本研究では、AE パラメータ解析により計測値 と環境ノイズとの分離を試みた.AE パラメータには、図 -4 と図 -5 に示す検出波形の特性を定量的に評価できる と考えられる *RA* 値(mmsec/V)と平均周波数(kHz)の関係を 用いた.

$$RA$$
値 = $\frac{立ち上がり時間}{最大振幅値}$ (2)

RA 値とは、検出された AE 波の波形の特徴を「立ち上 り時間」と「最大振幅値」で表現するものである.平均周 波数とは、FFT 解析から求められる周波数とは異なり、検 出波形の「カウント数」と「継続時間」の関係から対象と する AE 波の平均的な周波数を算出するものである.

既報の研究では、コンクリートの曲げ試験から AE パラ メータである RA 値と平均周波数の関係から検出される AE 波の特性の違いを「引張型 AE」ないし「せん断型 AE」



図 - 7 AE モニタリング状況(通常部)



図-8 AE レートプロセス解析結果

に分類している¹¹⁾.本研究では,日本建材協会において策 定されたJCMS-III B5706-2003の規定を準用して解析を行 なった.なお,本研究の対象は漏水現象であり,コンクリー ト曲げ試験とは現象が大きく異なることから,引張型 AE とせん断型 AE の判定は行わない.

b) 漏水部の AE パラメータ特性

制水弁の止水を行なわない通常管理下での RA 値と平均 周波数の関係を図 - 9 に示す.漏水部と通常部では,弾性 波特性の違いによると考えられる評価値の相違が確認さ れた.

c) AE 計測における環境ノイズの影響

配管施設の特徴は、管体が道路下に埋設されていること にある.その場合、AE 計測には車輌走行に伴う環境ノイ ズの影響を避けることはできない.従来法である漏水探知 などの漏水音の計測では、夜間計測や計測時の車輌通行止 めが不可欠であった.しかし、長期計測を考慮した場合、 漏水現象とノイズを計測中に区別する必要がある.漏水部 での車輌走行時 AE とそれ以外の漏水起源の AE を対象に パラメータ解析を行なった結果を図 - 10 に示す.車輌走行 ノイズに起因する AE は、平均周波数 50kHz 以下であり、



図-9 RA 値と平均周波数の関係

漏水起源の AE とは区別できることが確認された. この相 違は, RA 値と平均周波数が波形の形状特性を定量化する 指標であることから,図-4 および図-5 に示す検出波の 形状的な特徴に起因するものであると考えられる.

漏水現象とノイズとではAEパラメータ解析の結果が異 なる特徴を有することから、相違点に着目した解析により、 漏水現象のみを抽出できる可能性が本研究により確認さ れたものと考えられる.

7. 結論

本研究では,過年度に漏水が確認されている PC 管路で AE 計測と材質評価を行った.漏水部近傍では,通常部と 比較して AE 発生頻度が高く,AE パラメータ解析の有効 性が確認された.本論では,付帯工でのモニタリングを実 施したが,より広範囲の計測にはウエーブガイドを用いた 検討を追加することにより,検出精度の向上は可能である.

したがって,配管施設の漏水・損傷度評価には,管体の 構造的特質を考慮した材質評価に加えて AE 法による漏水 モニタリングが有効である.評価対象の損傷度を管材特性

(PC 管の場合,継手ゴム輪の劣化や PC 鋼線の腐食など) を踏まえて評価し, 危険部位での非破 AE モニタリングを 組み合わせることにより,施設の損傷度を踏まえた診断が 可能になるものと考えられる.

参考文献

- 名和規夫,園田和記,岩田博文,鈴木哲也:老朽化した管路 施設の機能調査評価,農業土木学会誌 70(12), pp31-35, 2002.
- 2) 鈴木哲也,大津政康:非破壊検査の適用による敷設後 30 年



- 図 10 RA 値と平均周波数の関係(車輌走行ノイズ) 経過した PC 管路の定量的損傷度評価,性能設計に関する勉 強会報告および研究発表会要旨集,pp49-52, 2004.
- 3) 鈴木哲也,大津政康:内水圧下で長期間供用した PC 管の材 質評価,農業土木学会論文集 235, pp. 75-76, 2004.
- 4) 土木学会:コンクリート標準示方書[維持管理編], pp. 86-87, 2001.
- 5) 大津政康:アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, p. 2, 1998.
- 6) 重石光弘,伊藤剛,伊藤博章,橘吉宏,大津政康:鋼・コン クリート合成部材の疲労損傷過程におけるアコースティッ ク・エミッション,シンポジュウム「コンクリート構造物の 非破壊検査への期待」論文集,pp.479-486, 2003.
- 神谷篤志,諸藤浩一,江沼数志,山田實,湯山茂徳:工水タンク模擬漏洩による AE の定量的評価に関する研究,圧力技術第40巻第4号,pp.56-64,2002.
- 8) 農林水産省構造改善局監修:土地改良事業計画設計基準 設計「パイプライン」技術書, pp. 447-449, 1998.
- 9) 横堀武夫:材料強度学,技報堂出版,1955.
- Masayasu Ohtsu: AE-Moment Tensor Analysis of In-Plane Wave by SiGMA-2D, The 3rd US-Japan Sym. On Advancing Application and Capabilities in NDE, CD-R, 2005.
- (社) 日本建材産業協会:コンクリートの非破壊検査方法, pp. 47-64, 2003.

(2006年9月11日受付)