

CCDカメラとレーダーによるデジタル画像の管路診断への適用技術の開発

田子 公一・五江 通・大橋 武一郎

Development of digital imaging system using CCD camera and GPR for pipeline inspection

Koichi Tago, Toru Goebuchi and Takeichiro Ohashi

Abstract

Recently, diagnosis and maintenance of urban infrastructure such as underground pipeline becomes more important for keeping safety and comfort of human life. Pipeline inspection using trench less technologies must be effective for such purpose. Some of existing technologies, such as video camera inspection is used for diagnosis of underground pipeline. However, in the conventional analog camera system, the quality of the captured images depends on the skill of field operators. It is also difficult to construct an effective data base system from data stored in a lot of video tapes.

A new digital imaging technology has been developed to solve the problems mentioned above. The imaging system provides an unfolded image of pipeline inside wall in a real time. The benefit of the consistent and high quality digital image compared to the conventional analog camera system is amenable to computer-assisted quantitative analysis that makes easy and compact archiving.

The system also provides inclination and meander data to characterize the vertical and horizontal deflection of the pipeline.

Furthermore, the Ground Penetrating Radar unit, which can be attached on the tractor of imaging system, has been developed to survey cavities behind pipelines. Some concrete pipeline including reinforcing iron bars usually makes GPR survey difficult, because of shield effect for transmitting wave and masking effect caused by strong reflection from the iron bars. Influence of reinforcing iron bars was reduced by installing an optimum design of GPR antenna.

The imaging system has been used for inspections of various kinds of pipes. From these records, effectiveness of unfolded image has been confirmed. Also, high resolution GPR records has proved that it is possible to detect cavities behind pipelines.

キーワード：非開削，管路診断，不陸蛇行，CCDカメラ，魚眼レンズ，展開画像，非破壊技術，地中レーダー

1. はじめに

主に都市部では、上下水道管・ガス管・電力や通信ケーブル管など、既に様々な埋設管のインフラ整備が進んでいる。しかし、これらの老朽化も同時に進行しており、健全に保つための管理が重要になっている。そのためには非開削で適用できる適切な診断システムが要求され、種々の既存技術が利用されている。たとえば、下水道を対象とした診断システムとして、テレビカメラによる定期的な管路内の観察が取り入れられ、その診断方法がマニュアル化されている。

しかし、このシステムでは現場技術者がテレビカメラで写し出された画像を見ながら不良箇所を特定して記録するため、測定に要する時間や記録の品質が測定者の技量に委ねられている。また、大量のビデオテープの保管や既存データの検索・再利用が非常に難しいという問題も指摘されている。このような問題は、下水道に限らず、あらゆる管路を診断する場合にも当てはまるものと思われ、改善が望まれている。

そこで、この問題を解決できる新たな管路診断技術を開発した。これは、管路内の画像をデジタルデータとしてリアルタイムで記録する技術である。管路壁面の画像を高品質で、くまなく得ることができるため、経験の少ない現場技術者でも重要な部分を欠測するようなことがない。また、デジタルデータとして記録するので、必要な画像へのアクセスが容易であり、再利用しやすいという特長を持つ。

さらに画像記録と同時に、管路の不陸や蛇行を測定する機能と管路背面の空洞を探索する機能を付加できるようにして管路診断機能を充実させた。

このシステムを実際の管路に利用して適用性を評価した結果、上記のような特長が活かされ、測定コストの低減と管路診断の品質を向上できることが確認できた。

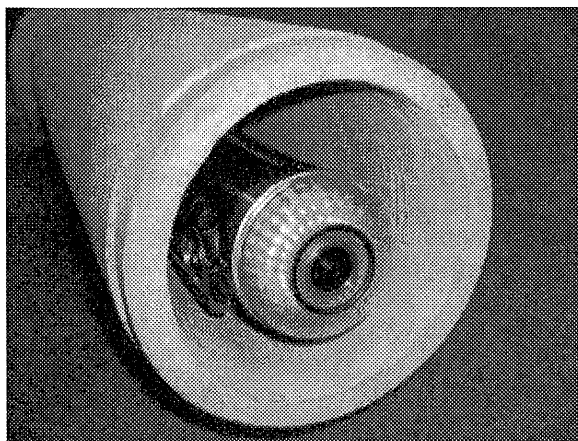


写真-1 カメラプローブ先端

Photo.1 The camera probe head.

2. デジタル画像記録機能

システムの中核となるのは、管路の壁面画像を展開図としてリアルタイムに得る技術である。壁面全体で、均等に高品質なデジタル画像が得られることが特徴である。写真-1に管路内に設置したカメラプローブの先端部分を示す。管路の中心に位置するカメラプローブ先端には魚眼レンズ付のCCDカメラが取付けられており、その周囲には照明用のLEDライトが配置されている。このカメラプローブは自走式の台車に搭載されており、管軸方向に一定速度で移動できる。CCDカメラで得られた信号は、図-1に示すようにケーブルによりアナログビデオ信号(NTSC方式)として伝送され、A/D変換によりデジタル画像に変換され、次章に述べるような原理により展開画像が生成される。

2-1. 展開画像の生成原理

展開画像生成原理の概念図を図-2に示す。カメラプローブに取付けられた画角約180度の魚眼レンズにより、管路の前方管軸方向からカメラのほぼ真横に位置する壁面までの画像を撮影することができる。このような光学系で撮影された管路壁面円周の画像は、デジタル画像上に同心円として写像される。

したがって、デジタル画像の円周上にあるピクセルを、下から時計回りにサンプリングして直線状に並び代えると、壁面を一周した展開画像を生成することができる。そこで、CCDカメラが一定の距離間隔を走行するごとに画像を記録して、上記のように直線状に変換して並べていけば壁面の展開画像が得られることになる。特に、管路が円形であれば、ピクセル上への写像はゆがみのない対応関係にあるので、そのまま壁面を展開した画像として生成される。

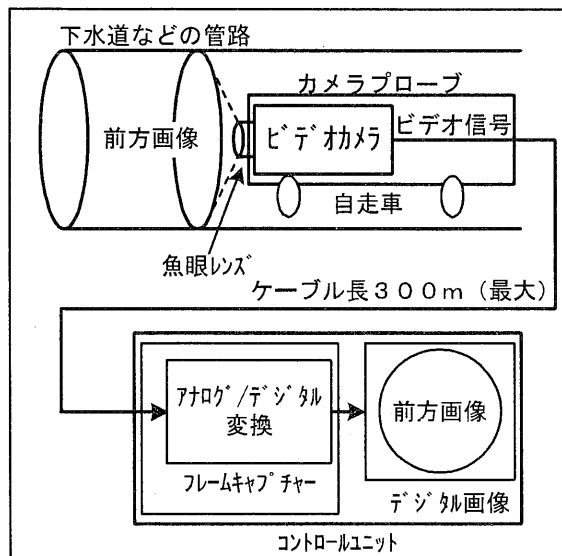


図-1 システムのブロック図

Fig.1 System block diagram.

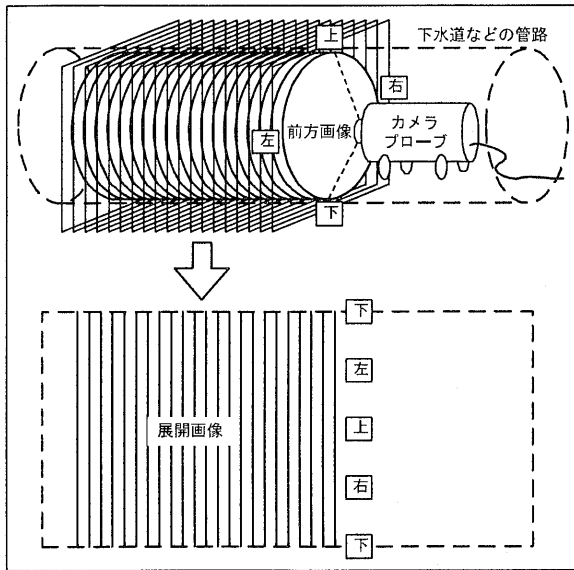


図-2 展開画像生成の原理

Fig.2 Method of unfolded image generation.

2-2. 展開画像の解像度

1) 管路の円周方向の解像度

管路の円周方向の解像度は、魚眼レンズで捉えた映像信号をデジタル化する時の解像度で決定される。本システムでは、NTSC方式のビデオカメラを使用しており、実際にはアナログ信号の周波数帯域が支配的であるが、縦方向の走査線数は525本、横方向の画素数は約700ピクセルの映像信号が得られる。この画像を横640×縦480ピクセルの画像サイズにデジタル化している。このデジタル画像から円周上のピクセルをサンプリングすることになるので、解像度はその円周が何ピクセルで構成されるかによって決まる。そこで、縦方向のピクセル数を直径とした円のピクセル数を算出すると(1)式となる。

$$480 \times \pi \approx 1500 \text{ (ピクセル)} \quad (1)$$

実際には、縦方向のピクセル数よりもやや内側の円周を設定せざるを得ないため、最大の円周上ピクセル数を1400とした。したがって、管路の直径をD(mm)とすると、円周上の解像度 λ (mm)は(2)式で示される。

$$\lambda = \pi D / 1400 \quad (2)$$

(2)式は管路の直径が大きいくほど解像度が低くなることを示している。(2)式から、管路の円周方向の解像度として1mm以下($\lambda \leq 1$)が確保できる管路の直径は以下のように求められる。

$$D \leq 1400 / \lambda \approx 450 \text{ mm} \quad (3)$$

すなわち、管径約450mmまでは、円周方向の解像度は1mm以下を確保することができる。

2) 管路の軸方向の解像度と走行速度

画像はカメラを移動しながら、一定の距離間隔ごとに撮影される。したがって、管路軸方向の解像度は、撮影位置の間隔によって決まる。高い解像度を得るためには間隔を小さくして撮影する必要があるが、1回撮影するのに要する時間は決まっているので、高密度に撮影するほどカメラの移動は遅くなる。言い換えれば、移動できる速度は1回の撮影に要する時間に依存する。使用しているビデオカメラの撮影速度は30フレーム/秒となっている。管路の軸方向解像度を円周方向と同じ1mmを要求すると、移動速度の最大値は以下のように求められる。

$$\text{最小撮影時間間隔} = 1/30 \text{ (秒)}$$

$$\text{この間の移動距離} = \text{軸方向解像度 (1mm)}$$

すなわち、1秒間に30mm進めることになる。これを1分間に移動できる距離に換算すると1.8mとなる。

管路診断を効率的に行うには、できるだけ早く走行できることが望ましいが、NTSC信号の制約から走行速度が制限されてしまう。そこで、図-3に示すように、1フレームのデジタル画像から、管路の軸方向間隔が1mmに相当する2つの同心円上のピクセルを同時にサンプリングするようにして、最大測定速度を2倍の3.6m/分まで可能としている。

原理上、この同心円の数を増やせばさらに高速化が可能であるが、内側の円周になるほどピクセル数が減少して分解能が落ちること、管壁面上の実距離と展開画像との距離誤差が大きくなり、展開画像の連続性が損なわれることから、マルチラインサンプリング数は2サンプリングライン/フレームとしている。

2-3. 得られる画像の例と特長

写真-2は、下水道管路内の画像である。先に述べた1フレームの画像に相当し、これを前方画像と呼ぶ。このような画像を軸方向に1mmごとに撮影し、その画像の円周上のピクセルをサンプリングしていくと図-4に示すような展開画像が得られる。展開画像は、走行台車が管路を移動するのに伴いリアルタイムに順次生成され画像として映し出され、デジタル記録される。

写真-2の前方画像は、図-4の左側取付管付近の画像である。展開画像は、管面全体を広げて見ることができ、特に円周方向に伸びる亀裂を確認することが容易である。また、前方画像だけでは、管軸方向の亀裂連続性や亀裂の幅を観察することは難しい。しかし、デジタル展開画像の場合は、管軸方向、円周方向とも1ピクセル当たりの解像度が計算できるので、亀裂幅を定量的に評価できる。「下水道管路施設テレビカメラ調査マニュアル」によれば、表-1に示すように亀裂幅による判定基準が決められており、定量評価をすることが求められているので、このような評価を下すのにも有効なシステムであると考えられる。

デジタルデータには、上記のような定量評価が容易で

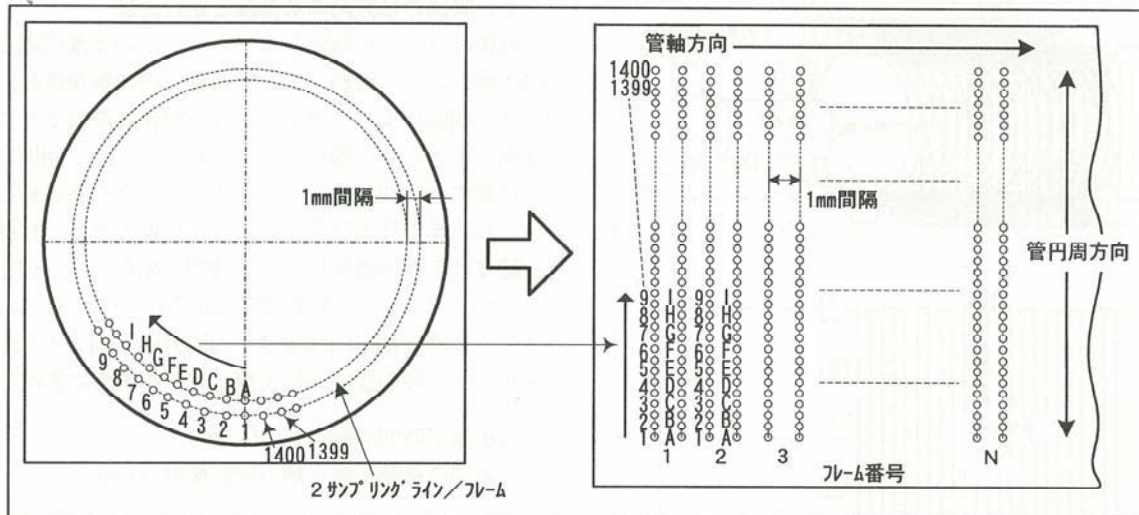


図-3 マルチラインサンプリングによる高速化の原理

Fig. 3 Method of multi line sampling for high speed measurement.



写真-2 前方画像の例

Photo. 2 Example of forward image.

あるという特長の他にも、欲しいデータをすぐに検索できるという特長がある。下水道の管路診断では、健全度や損傷・劣化の進行度を把握するために、供用開始後30年までは10年に1回、30年以降は7年に1回の調査周期が提案されている。

データの保管とアクセスが容易であるという特長を持つデジタルデータは、このような過去のデータとの比較が必要な維持管理にも適しているといえよう。

3. 不陸蛇行測定機能

管路の不陸（管軸方向の上下の変位）および蛇行（管路の横方向の変位）を測定することは、特に接続部の変状を知るために有効である。そこで、デジタル画像と同時に記録する機能を付加した。

不陸と蛇行は、走行する台車の3次元的な方位を測定

して台車が走行した軌跡から求めている。3次元方位は傾斜センサーと光ファイバージャイロを組み合わせる測定する。この3次元方位の測定方式は航空機などの姿勢計測などにも利用される優れた方法ではあるが、ジャイロは角速度を検出するセンサーなので、時間積分して角度を求める必要がある。そのため、埋設管路など途中で方位が確認できない長距離の測定では誤差が累積するので注意が必要である。また、管路の形状は台車の走行軌跡として求められるので、台車が管路内で中心軸からずれるとそれが管路の変位であるかのように表現されることになる。そのため、測定結果は、細かな変化などにはあまりこだわらずに管路の相対的な変化を把握するものとして利用している。なお、下水道管路のようにマンホールにおいて、始点と終点の標高値などが得られる場合は、絶対値として補正できる。

測定記録例を図-4の下部に示す。点線は蛇行を、実線は不陸を示している。下水道管路は一定の勾配をもたせて自然に流下するように施工されているが、周囲の地盤沈下や管路の変形などに伴い、流れが阻害されると問題になるので、管理上、不陸の情報は特に重要である。測定例の場合は、左側から右側へ流下する管路であるが、左側取付管の付近でやや浮き上がっていることが分かる。

4. 管路背面空洞探査機能

埋設した管路が損傷して、周辺の地下水と共に土砂が管路に流入すると、管路周辺に空洞を形成する場合がある。特に下水道の場合は、道路直下に埋設されている場合が多く、空洞の規模が増大すると、道路の陥没事故を誘発することもある。

道路面下の空洞を調査する場合は、地表面から地中レーダーを用いる手法が広く利用されているが、地下数メートルに埋設された管路周辺の小規模な空洞を探査することは困難である。

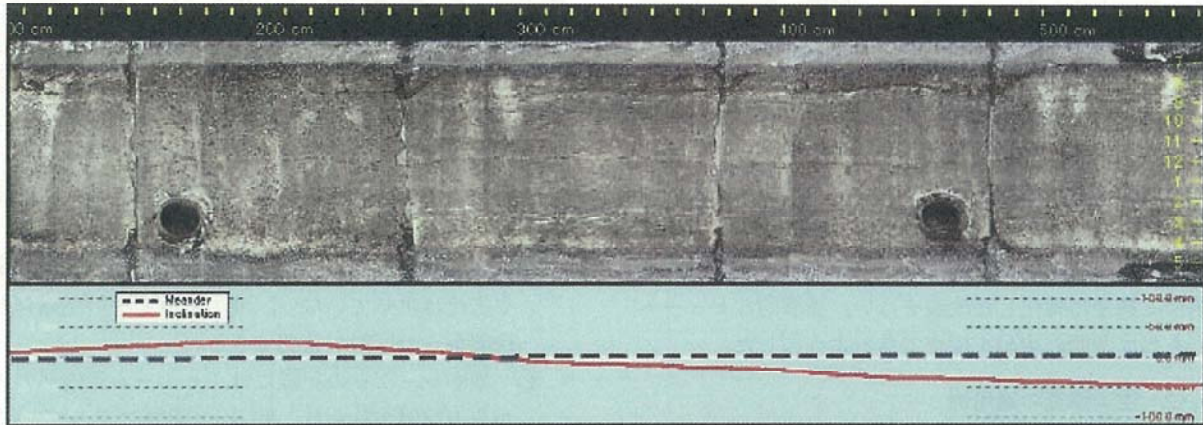


図-4 展開画像データの例
Fig. 4 Example of unfolded image data.

表-1 下水道の管路判定基準例（下水道管路施設テレビカメラ調査マニュアルより抜粋）
Table. 1 Judgments standard of sewer pipeline fault.

項 目		ランクA	ランクB	ランクC
管の破損 (軸方向)	鉄筋コンクリート管	欠落または、軸方向のクラックで幅：5 mm以上	軸方向のクラックで幅：2 mm以上	軸方向のクラックで幅：2 mm未満
	陶 管	欠落または、軸方向のクラックが管長の1/2以上	軸方向のクラックが管長の1/2未満	基準なし
管のクラック (円周方向)	鉄筋コンクリート管	円周方向のクラックで幅：5 mm以上	円周方向のクラックで幅：2 mm以上	円周方向のクラックで幅：2 mm未満
	陶 管	円周方向のクラックでその長さが円周の2/3以上	円周方向のクラックでその長さが円周の2/3未満	基準なし

そこで、管路内面からレーダー探査を行うことにより、管路損傷に起因する空洞を探査することができる機能を付加した。

管路の内部から探査するために、写真-3に示すように、走行する台車にパンタグラフ機構により懸架されたアンテナを壁面に押し当てながら走査する方法とした。アンテナの寸法上、適用管径は250mm以上であるが、それ以下の管路に適用する場合は、アンテナを別の専用ソリに取付けて牽引することで測定は可能である。

4-1. 空洞探査機能の技術的要件

本システムを海外の下水道で適用すること考えると、1回の測定長として300m程度とすることが要望されており、地中レーダーの高周波信号をそのまま伝送することが不可能である。そのため、アンテナを搭載した走行台車にデジタル変換回路を搭載して、デジタル信号による伝送方式とした。

また、アンテナを壁面に押し当てるパンタグラフは電動式として、カメラで障害物を確認した場合は、アンテ

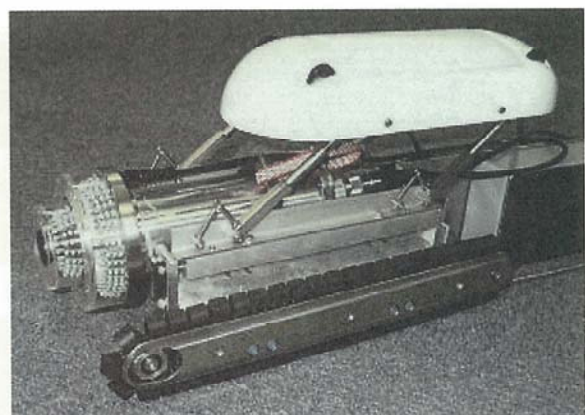


写真-3 レーダーカメラプローブ
Photo. 3 Radar camera probe.

ナを上下できるようになっており、壁面に適度な力で押し当てて無理なく走行できるようにした。

管路の材質は、ヒューム管、塩ビ管、陶管が主であるが、ヒューム管には鉄筋が数cm間隔で入っており、従来のアンテナでは鉄筋による反射の影響が大きい。そこで、その影響を極力軽減するために、アンテナ面を円弧状にして管路面との距離を一定にする形状にし、送出する電磁波の周波数を1.5GHzに高めるなど、管路内部で使用する条件に特化した改良を行い、標準的なヒューム管であれば背面の空洞を探查できるようにした。

4-2. 空洞探查の適用例

1) ヒューム管への適用例

図-5は、深度約2mに埋設された直径300mmヒューム管に適用した例を示す。図中、最上段から管路の不陸、蛇行、地中レーダーの記録、空洞解析結果、最下段はカメラによる展開画像を示す。空洞解析結果は、特定の強

度を超える反射波が得られた場合には、それを空洞と仮定したときの位置と目安としての大きさを自動解析して表示するものである。なお、空洞以外の反射波でも自動解析を行い、そこにはあたかも空洞が存在するというような解析を行うこともあるので、最終的には画像データと比較して総合的に判断する必要がある。図-5の結果からは、以下のようなことが分かる。

- ① 展開画像からは、管の接続部が明瞭であり、損傷や劣化は生じていない。地中レーダーの記録にも接続部からの反射が確認できる。
- ② 地中レーダーの記録には、ヒューム管内部の鉄筋からの反射がみられ、約6cm間隔になっていることが確認できる。
- ③ 取付管の部分では、地中レーダーの反射記録が明瞭に捉えられており、空洞解析結果で空洞として表示されているが、画像記録からここには取付管があることが正確に判断できる。

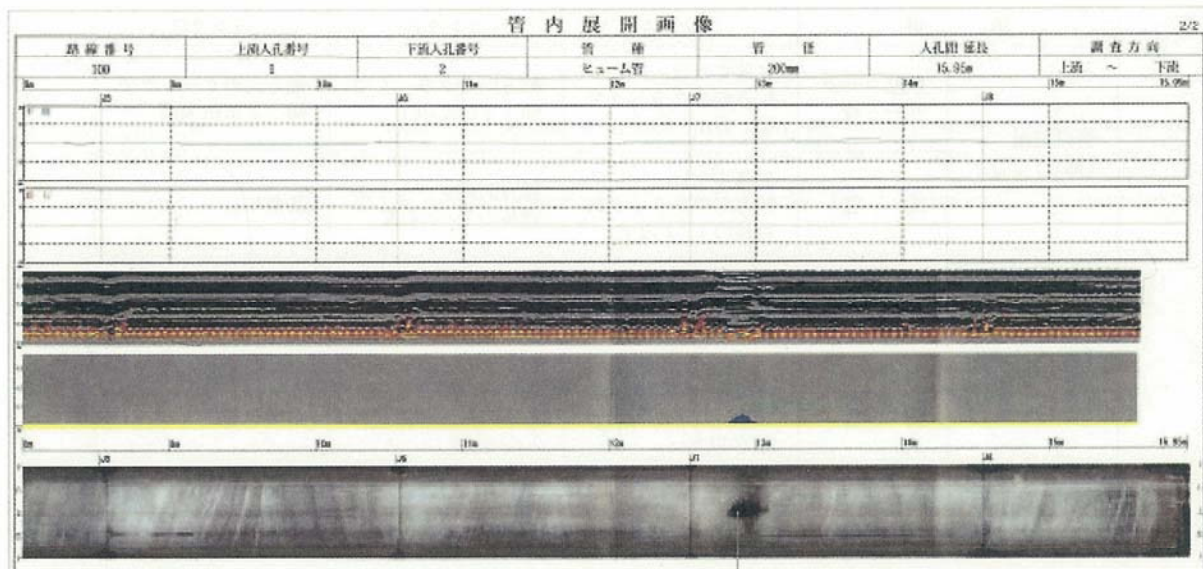


図-5 ヒューム管におけるレーダー記録例

Fig. 5 Example of radar reflection record (Hume pipe).

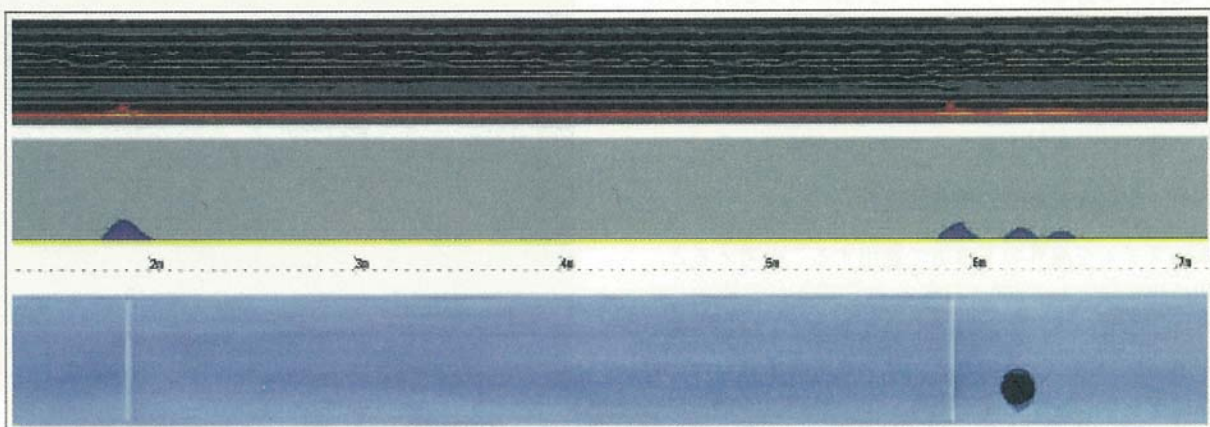


図-6 塩ビ管におけるレーダー記録例

Fig. 6 Example of Radar reflection record (PVC pipe).

2) 塩ビ管への適用例

図-6は、深度約2.5mに埋設された直後の直径200mm塩ビ管に適用した例を示す。この結果からは、以下のようなことが分かる。

- ① 展開画像からは、管の接続部が明瞭に判断できる。損傷や劣化はまったく見られない。
- ② 地中レーダーの記録には、空洞によるものと思われる反射は見らないが、管の接続部と取付管付近で地中レーダーの反射が確認できる。

5. あとがき

管路の診断技術は、生活に欠かせない資産を可能な限り維持して、将来にわたって有効に利用するため、また管路の劣化に伴う事故を未然に防ぐためにも不可欠な技術である。1960年代に設備された都市部の下水道、電力線路や通信線路などの地中設備は、すでに40年以上を経過し、その維持管理が都市再生の観点からも見直されてきている。地下埋設管路の診断技術はますます重要となる。

このような観点から、管路のデジタル展開画像を得る技術を開発したが、現状のテレビカメラ技術では測定速度や解像度には限界があるため、さらに短時間でより良い解像度で測定できる技術が望まれる。ハイビジョンやデジタルテレビ放送などの普及が予想される技術革新の流れの中では、それほど遠くない将来に、そのような技術も実現可能であろう。

また、いくつかの非破壊探査技術を複合することにより、より効果的な地下埋設物の維持管理技術になるものと考えて、今回は不陸・蛇行測定機能と空洞探査機能を組み合わせるようにしたが、この他にも内空変位の測定など、種々の有効な機能を付加することが考えられる。管路によっては、今回の適用口径範囲外のものもあり、小型化や大口徑への適用、円形断面以外の管路の展開画像技術などの課題が残されている。

管路内部からの診断技術は、さまざまな維持管理分野への応用が期待されるものであり、今後もこれらのニーズに適用できる技術開発を進めたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 下水道管路施設テレビカメラ調査マニュアル 社団法人日本下水道協会 平成12年12月
- 2) T.Iseley, D.Abraham, S.Gokhale, "Intelligent Sewer Condition Evaluation Technologies", Proceedings of International No-Dig Conference, page 254-265, 1997.
- 3) K. Karasaki, H. Shima, T. Iseley, "The coming of Age of Advanced Digital Optical Scanning Technology for the Assessment", Proceeding of International No-Dig Conference, 2001.
- 4) オーヨーコーポレーション, ユーエスエー, 島裕雅,

唐崎健二, アイズリー デビット トーマス, 五江洵通, 佐野康, 飯沼博幸, パイプラインの欠陥を検出する装置および方法, 国際出願 PCT/US01/17390, 2001-5-30.

