

衝撃弾性波法による管路調査・診断システムの開発



技術解説

鎌田 敏郎^{*}, 浅野 雅則^{**}

Development of sewage pipeline inspection and diagnosis system using
Impact Elastic-Wave Methods

Key Words : Impact Elastic-Wave Methods , sewage pipeline , maintenance , inspection, diagnosis

1. はじめに

近代下水道がわが国に導入されてから100年以上が経過し、総敷設延長は全国で37万km以上に上る¹⁾。下水管路は社会基盤を形成する構造物の一翼を担っており、その適切な維持・管理を行うことは極めて重要である。下水道管路施設の老朽化は、埋設条件下における外力の作用により破損等の原因となり、道路の陥没²⁾を引き起こすなど(図-1)、深刻な社会問題となる可能性を秘めている。

下水管路、特に人が管路内に入って直接作業ができない中小口径(直径800mm以下)の管路では、主にTVカメラを用いた調査が行われており、その調査結果に基づき管路更生の必要性の有無の判断や工法選定を行っているのが現状である。

TVカメラ調査は、検査員がカメラ映像を目視で確認し管内面の状況を評価する手法である(図-2)。このため、管内の状況を直接的に把握することができ、幅の大きなクラックの存在等を発見できるが、管の厚みの変化や管外面の状況を評価することは困難である。また、人間の目で評価を行うため、評価結果は検査員の経験に左右され、客観的な評価を行うことも困難である。適切な維持管理を行うためには管路の状態を適確に判断することが重要であり、現状における目視検査では限界がある。

このような調査の現状から、より定量的に管の劣化状態を把握する手法が望まれている。



図-1 道路の陥没事例¹⁾



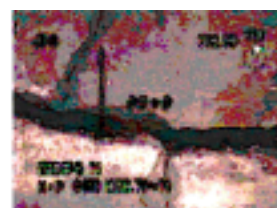
^{*} Toshiro KAMADA
1962年12月生
1986年東京工業大学工学部土木工学科卒業
現在、大阪大学大学院・工学研究科・地球総合工学専攻、教授、博士(工学)、維持管理工学
TEL 06-6879-7619
FAX 06-6879-7619
E-mail : kamada@civil.eng.osaka-u.ac.jp



^{**} Masanori ASANO
1977年4月生
2004年岐阜大学大学院・工学研究科・生産開発システム工学専攻修了
現在、積水化学工業株式会社・環境・ライフラインカンパニー・環境土木システム事業部・ソリューションセンター、博士(工学)、構造物の維持管理(調査・診断)
TEL 077-553-4101
FAX 077-553-4109
E-mail : asano029@sekisui.jp



直視画像



拡大画像

図-2 管内映像

そこで、コンクリート構造物に対して有効かつ適用の可能性が高い衝撃弾性波法³⁾に着目し、調査・診断システムの開発を行った。本稿では、衝撃弾性波法の原理と本システムの特徴および実管路への適用事例について概説する。

2. 衝撃弾性波法の原理

衝撃弾性波法とは、管に軽い衝撃を与えることにより対象物体を振動させ、その振動を計測・解析する非破壊検査手法である。土木分野ではこの手法がPCグラウトの充填度評価⁴⁾、構造物の寸法(板厚)計測⁵⁾など多岐にわたり用いられている。これは、入力する弾性波の周波数帯域が低い(数10kHz程度)ため、コンクリート等の内部での減衰が小さく弾性波が伝播しやすいことなどによる。計測概略を図-3に示す。

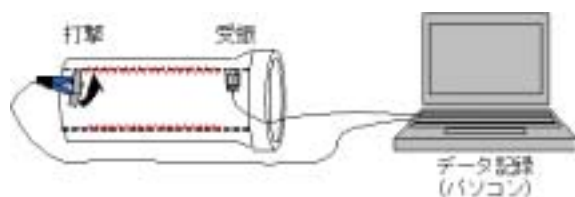


図-3 計測概略図

ここで紹介する衝撃弾性波法は、得られた波形から計算された周波数分布を用いて評価を行うものである。図-3に示したように管に衝撃を与えると、図-4に示すように管全体が振動する挙動を示す。

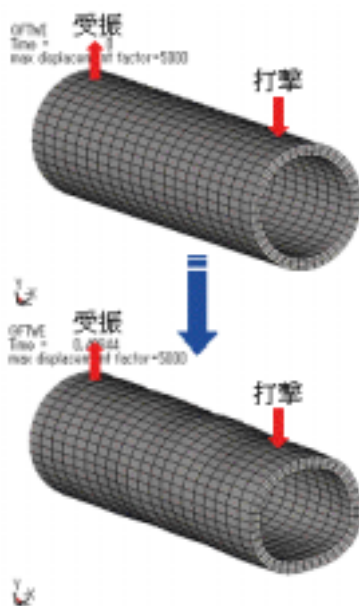


図-4 管の振動挙動(FEM解析結果)

このため、受振点にて得られる波形には管全体の情報が反映されることになる。

実際に健全管とクラック管にて計測した結果を図-5に示す。なおクラック管はJIS5372に準拠した載荷試験により軸方向にクラックを導入したものである。載荷試験により得られた荷重-変位曲線を図-6に示す。

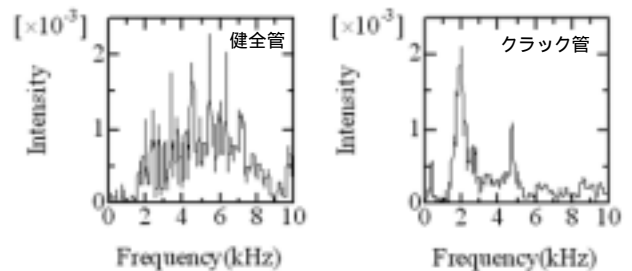


図-5 周波数分布

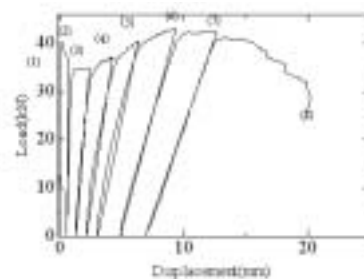


図-6 荷重-変位曲線

健全管に対してクラック管では低周波成分の割合が増加しており、明らかに異なった様相を呈することがわかる。

3. 劣化程度の数値化

本手法では、周波数分布を数値化し、剛性の低下との関係を定式化するという試みを行った。

図-7に自立指数推定の考え方を示す。自立指数とは、本システムにおいて管の剛性の程度を示す値として定義しており、新管(健全)の状態を100、破壊に至った状態を0とするものである。

衝撃弾性波法で得られる周波数分布は、管の剛性と密接に関係することから、管の剛性の低下を管の自立指数の低下とみなし、得られた周波数分布により自立指数を推定するものである。管の剛性として、荷重-変位曲線の傾き(図-6参照)を用いることとする。管の初期勾配を剛性1とした場合に対する各載荷ステップの傾きの割合を「剛性低下率」とし

て定義する。

また、周波数分布の特徴を数値化するために、図-8のような処理を行っている。このようにして求められた面積比を「高周波成分比」と定義する。上記のようにして求められた管の剛性低下率と高周波成分比の関係を図-9に示す。

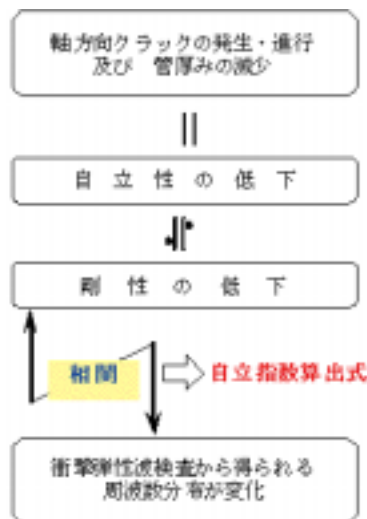


図-7 自立指数推定の考え方

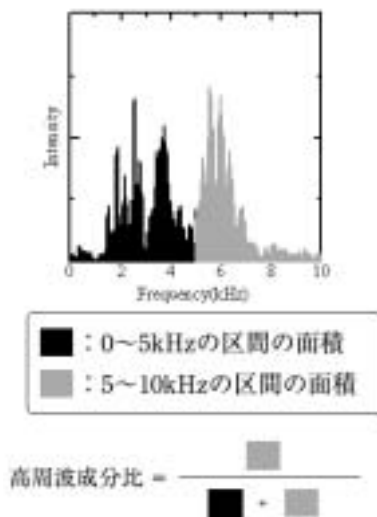


図-8 周波数分布の数値化

図-9からわかるように、剛性低下率（S）と高周波成分比（X）の間にはほぼ直線的な関係があることがわかる。

この図において、高周波成分比56%の場合（載荷前）を自立指数100、高周波成分比21%の場合（破壊後）を自立指数0として、自立指数と高周波成分比の関係を導く。

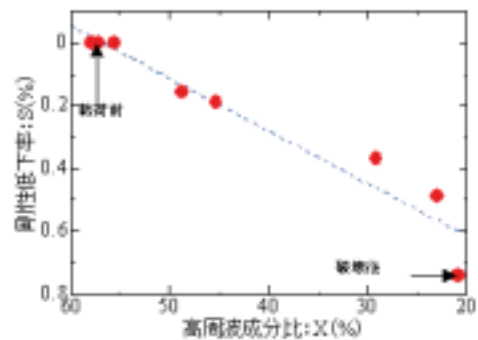


図-9 剛性低下率と高周波成分比との関係

$$G = 2.86X - 60.16 \cdots (1)$$

ここに、G：自立指数、X：高周波成分比（%）である。この式を自立指数算定式とする。

したがって、高周波成分比が把握できれば、管の自立指数を算出することができる。

4. 管路調査・診断システムの特徴

衝撃弾性波法管路調査・診断システムの特徴を以下に示す。

非開削・非破壊で検査ができる。

ロボットによる調査のためスピーディかつ定量的な診断が可能

物理現象に立脚した判定手法のため、人為的ばらつきの影響を受け難い。

付着物に隠れたクラックも検出可能

本システムの対象管種は鉄筋コンクリート管および陶管である。また対象となる管口径は、φ200mm～700mmである。

5. 検査ロボットの特徴

検査に用いるロボットは、2機種ラインアップされている。以下にロボットの概略を示す。

牽引型検査ロボット

衝撃弾性波検査用のロボットが自走式のテレビカメラ機に牽引され走行するタイプである。有線式で、陸上に設置したコントローラにて操作を行うものである。図-10に検査ロボットを示す。

ロボットの機能は、衝撃弾性波検査が行える打撃・受振ユニットで構成されている。また打撃部と受振部の側にCCDカメラを配置し、計測状況をモニタできる機能を有する。

マンホール内に設置する際には、中央部（打撃ユニットと受振ユニットの連結部）を折り曲げて設置

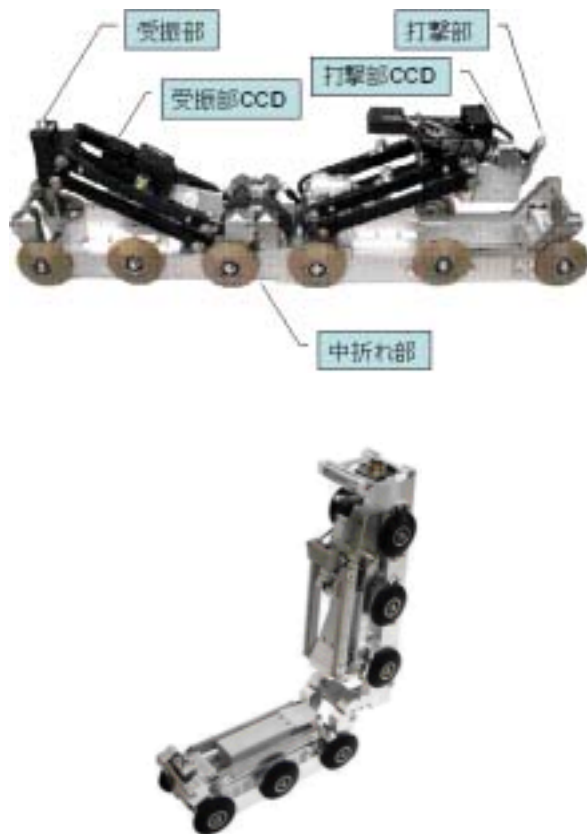


図-10 牽引型検査ロボット



図-11 複合型検査ロボット

できるよう設計されている。

複合型検査ロボット

複合型検査ロボットは、自走式でテレビカメラ機能を搭載した衝撃弾性波検査用のロボットである。有線式で、陸上に設置したコントローラで操作を行う。

図 - 11に複合型検査ロボットの概略図を示す。計測時には、図 - 11に示したようにパンタグラフ形式にて打撃・受振テーブルが上昇する。テーブルは電動スライド機能により計測間隔が任意の長さ (450mm ~ 1500mm) に調整可能である。

なお本ロボットは2005年に開催された「愛・地球博」に「Dr. Impact」という名称で展示され、実演が行われた。実演状況等は7.にて紹介する。

6. 現場での作業状況

現場では、ロボットを人孔から投入し、管内を走行・調査させる。ロボットの人孔内投入状況を図 - 12に示す。



図-12 ロボット設置状況

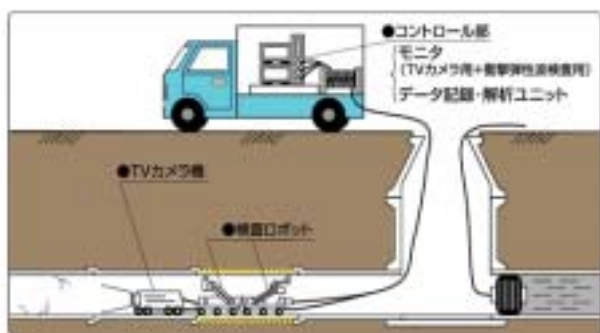


図-13 現場計測のイメージ



図-14 計測画面の一例

また、調査を行う場合には、地上から計測作業を行う。現場での調査イメージを図 - 13に示す。

計測されたデータは、図 - 14のような形式にてパソコン上に表示される。データの解析は、株式会社リハビリ・リサーチ・ラボラトリー（筆者の一人である鎌田が代表取締役社長を務める。）にて行っている。

7. 現場計測データ

ここでは、実管路において衝撃弾性波検査を行った結果の一例を紹介する。対象とした管路は、管口径：250mm、管種：B型1種鉄筋コンクリート管、スパン延長（人孔間距離）：23.20mである。

なお調査にあたっては、衝撃弾性波検査法と同時にTVカメラでの目視調査も行った。

対象管路にて得られた結果を図 - 15および図 - 16に示す。図には、写真位置に対応する衝撃弾性波検査により得られた周波数分布をそれぞれ示している。

これらの図から、変状がない場合（健全と考えられるもの）の周波数分布は、5～6 kHzの領域にピークを持つ形状である。

これに対して管軸方向にクラックが生じている場合には、2～3 kHzの領域に主な成分が分布している。これら周波数分布形状の傾向を数値で表現するため、5. で検討したように周波数分布の面積比（高周波成分比）を用いて定量化を行った。なおロボットで計測を行った結果、周波数成分はそのほとんどが7kHz以下に成分を有する傾向を示すことが明らかとなっているため、ここでは周波数区分として上限の周波数を7kHzとし、高周波成分と低周波成分の境界を3kHzとして高周波成分比を算出した。

上記のようにして求められた高周波成分比は、変状なし：74.6%，軸クラック有り：41.6%となる。

高周波成分比から式（1）を用いてクラック管の自立指数を算出すると、58.8となる。

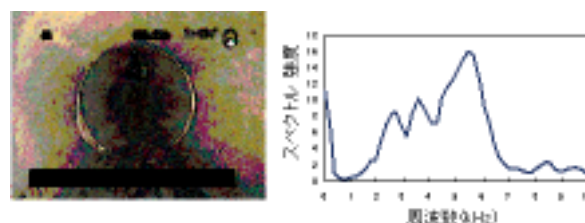


図-15 健全管の写真および周波数分布

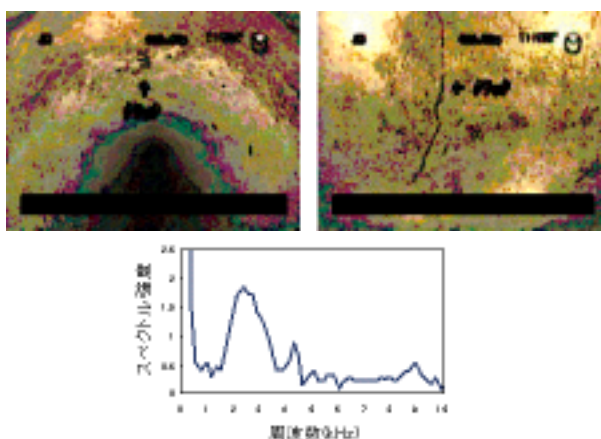


図-16 軸クラック管の写真および周波数分布

この管体は健全の管体に比べて6割弱の剛性しか保有していないと考えられ、何らかの対策が必要と考えられる。

対策としての改築や修繕は、基本的にスパン単位で考え、劣化の度合いや敷設年度および経済性などを勘案して決定される⁶⁾。

管路の更生工法として、例えば図 - 17に示すようなオメガライナー工法（小口径管路）、図 - 18に示

すようなSPR工法(中・大口径管路)などが既に開発され、日本各地の下水道管路に対して施工が実施されている。

現在、衝撃弾性波検査法にて得られる自立指数を更生工法の設計に使用すべく、更なる研究を進めている。

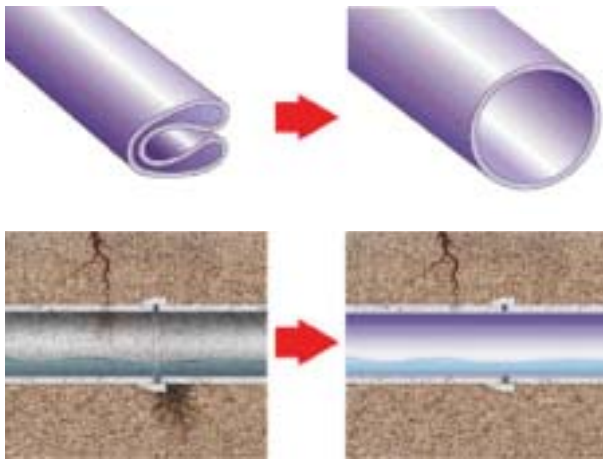


図-17 オメガライナー工法

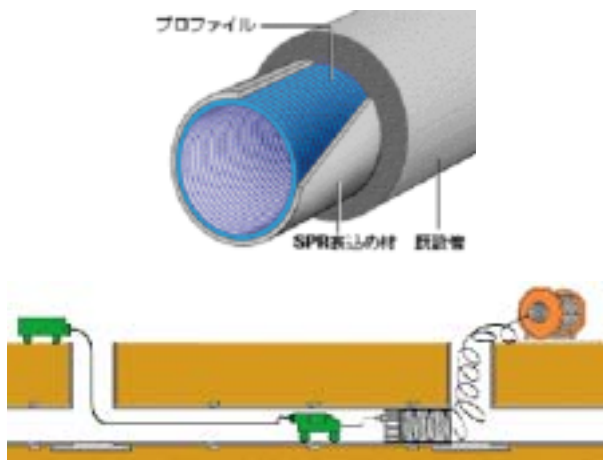


図-18 SPR工法

8. おわりに

基礎研究・適用研究に加えて、技術の普及および維持管理技術の高度化を推進させる目的で、各地で展示や実演も行っている。その代表事例として、「愛・地球博」の「プロタイプロボット展」に出展した状況を図-19に示す。

愛・地球博では、子供から大人さらには海外からの参加者にいたるまで、多くの方々に興味を持っていただくことができ、成功裡に終わった。



図-19 愛・地球博での実演実況

下水道は、道路・鉄道等その他インフラと同じく重要な社会基盤施設であるが、地中に埋設されている性質上、一般的な興味を引くことが少なく、ともしればライフライン施設としての認識が低い場合も

ある。

本稿が下水道施設における維持管理の重要性に対する意識向上に役立てば幸いである。

謝 辞

「愛・地球博」における「プロトタイプロボット展」での展示・実演に際しては、「Dr. Impact」の開発に当たり、NEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)のプロトタイプロボットプロジェクトより支援を受けた。記してここに謝意を表する。

参考文献

- 1)(社)日本下水道協会：日本の下水道，2005
- 2)国土交通 省都市・地方整備局 下水道部ホームページ

(<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewera-ge/data/02-07.pdf>)

- 3)(社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書，pp.49-67，2001
- 4)鎌田敏郎，浅野雅則，国枝泰祐，国枝稔，六郷恵哲：弾性波特性パラメータを用いたPCグラウト充填評価手法，土木学会論文集，No.746/V-61，pp.25-39，2003.11
- 5) Sansalone，M. and Streett，W. B.：Impact Echo，Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry，Bullbrier Press，Ithaca，NY and Jersey Shore，PA，1997
- 6)(社)日本下水道協会：下水管きょ改築等の工法選定手引き(案)，2002

