

下水道管渠劣化診断における 衝撃弾性波検査法の開発と実用化

大阪大学大学院工学研究科
地球総合工学専攻 教授

鎌田 敏郎

公益財団法人 日本下水道新技術機構
研究第二部 研究員

浅野 雅則

1. はじめに

わが国の平成 23 年度末時点における下水道管路の総延長は約 44 万 km となっており、社会資本として膨大なストックとなっている¹⁾。下水道管路施設も橋梁やトンネルと同様に老朽化が顕在化しており、道路陥没等の問題が発生している²⁾。このような事態になった場合、経済的な損失のみならず人命にかかわることも懸念され、未然に防止することが求められる。しかしながら地下に埋設された構造物は、存在自体が認知されにくいことから、一般に実態がどのようになっているのかを把握する機会は多くない。

道路陥没等は、管の耐荷力が作用荷重に対して小さくなった場合に発生するものであり、調査ではこの点を把握できることが望ましい。現在人が入ることのできないφ 800 未満の管渠については、小型の TV カメラロボットを管内に挿入し内面から目視調査を行う方法が採用されている³⁾。この方法は、視覚情報を用いるものであり、直感的に分かりやすい利点を持つものの、主観に頼った調査方法である。また管の耐荷力を定量的に評価することも困難である。

一方構造物を簡易に点検する方法として、「打音点検」が用いられることが多い。トンネル等では壁面をハンマ等で打撃し、発生する音を人の耳で確認し健全性を判断するものであり、発生音の音質（高い・低い等）を利用するものである。定性的ではあるものの、対象物の状態により振動状態が異なるものを利用したものである。著者らはこのことに着目し、非破壊かつ非開削工法である衝撃弾性波検査法を用いて打撃により発生する振動を工学的に解釈することで、主にコンクリート下水道管を対象として、その劣化診断の可能性を検討してきた。

本稿では、実現場における実証試験の結果をもとに、その適用性および有効性について述べ、本手法による下水道管の定量的劣化診断の可能性を明らかにする。

2. 衝撃弾性波検査法

2.1 測定方法

弾性波の入力・測定には図 1 に示す専用の管内測定ロボットを用いた。打撃部にはインパルスハンマが搭載されており、受信部には加速度センサ（～10kHz までの周波数領域）が搭載されている。また各センサ近傍には CCD カメラが搭載されており、打撃部および受信部の状況が確認できる。

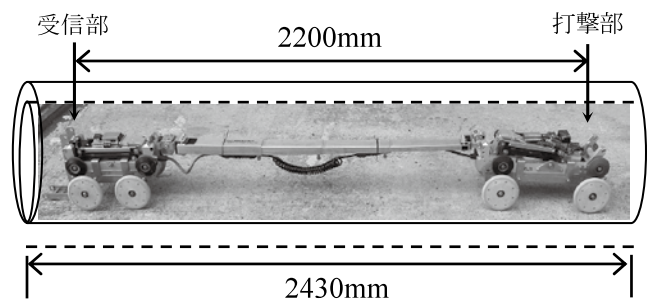


図 1 測定ロボットの概要

2.2 測定データと数値化方法

本システムでは打撃により発生し伝搬した弾性波を時間－振幅関係として取得する。得られた波形について FFT（高速フーリエ変換）を実施することにより周波数分布を求めた。

図 2 に周波数分布の模式図を示す。本研究では周波数分布を数値化した「高周波成分比」を周波数パラメータとして定義した。高周波成分比は式 (1) により求めた。

$$F = S_2 / (S_1 + S_2) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 F ：高周波成分比 (%)

S_1 ：0.5 ～ 3.5kHz までの面積（図中の ■）

S_2 ：3.5 ～ 7.0kHz までの面積（図中の ■）

である。

高周波成分比の計算において、低周波のノイズの影響を除去する目的で 0.5kHz 未満の領域を省くことと

した。また高周波領域と低周波領域の境については、上限値 7.0kHz の中央値として 3.5kHz を採用した。

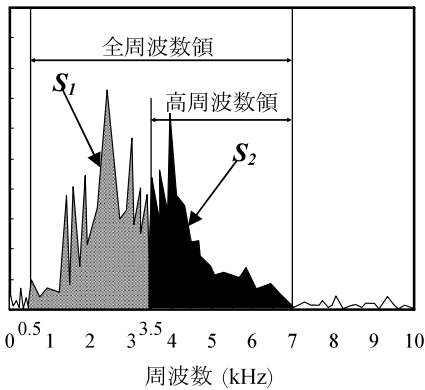


図2 周波数分布の模式図

3. 供試体概要

3.1 管の種類

下水道用鉄筋コンクリート管 (JSWAS A-1 外圧 1 種管) を対象とした。実験には内径 600mm、長さ 2430mm の管を用いた。

3.2 供試体の詳細

今回の検討では、腐食による減肉を想定した管を作製した。管の作製については、JSWAS A-1 記載の方法に準拠した遠心力成型とした。コンクリートは普通ポルトランドセメントを用いて作製した。W/C : 37%、 G_{max} : 15mm、配合強度 : 53.4MPa である。補強鉄筋は線径 4mm (管円周方向) および 5mm (管軸方向) のものを用い、断面の中央に配筋した。

4. 管の破壊試験

減肉管の耐荷性能を確認するため、管を JSWAS A-1 に準拠した試験により破壊させ、荷重-管頂変位曲線を求めた。図 3 に試験状況を示す。管頂変位の測定には図 3 に示すようなダイヤルゲージを用いた。試験においては、管のひび割れ荷重値および破壊荷重値を記録するとともに、管に生じるひび割れ幅の測定も行った。

5. 測定結果

5.1 減肉量と周波数分布の関係

高周波成分比と管厚の関係を求めた。その結果、図 4 に示したように管厚みと高周波成分比には、管厚ごとに徐々に高周波成分比が小さくなる傾向にあり、両者には直線的な関係が確認される。これにより高周波成分比を用いた管厚程度の評価が可能であるものと考えられる。

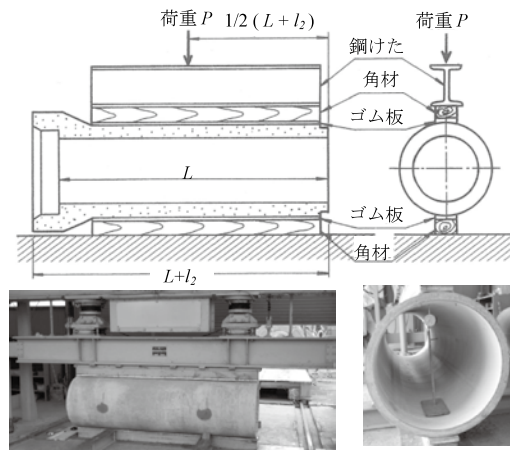


図3 破壊試験概要 [JSWAS A-1]

5.2 管の破壊試験結果と高周波成分比の関係

図 5 に高周波成分比と破壊荷重値との関係を示す。破壊荷重値と高周波成分比は概ね直線的な関係にある。今回対象としたのは減肉事象であり断面の耐荷性能に直接結びつくものである。この結果より高周波成分比から管の破壊荷重値の推定が可能であることが確認できる。

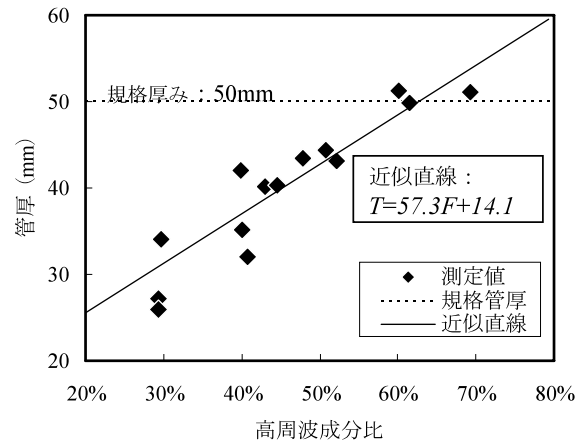


図4 高周波成分比と管厚の関係 [地上実験]

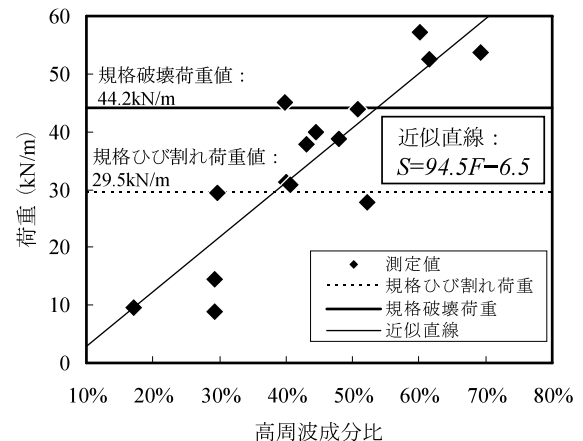


図5 破壊荷重値と高周波成分比 [地上実験]

6. 管の耐荷性能評価方法

衝撃弾性波法により得られる結果から、測定対象管の厚みと破壊荷重値が計算できる。これらの情報を活用して、管の埋設状態における安全性の検討を実施する。破壊荷重値が得られることから、管の破壊保証モーメントを用いた耐荷性能の計算を行う。以下に示す計算手法はJSWAS A-1記載の方法を参考にした。管の耐荷力と埋設条件下で作用する荷重（死荷重と活荷重の合計）を比較することで管の安全率を求めるものである。

【管の破壊保証モーメント】

$$M_B = 0.25Sr + 0.165Wr \quad (2)$$

ここに、 M_B :管の破壊保証モーメント (kN・m/m)、 S :管の破壊荷重値 (kN/m)、 r :管の管厚中心半径 (m)、 W :管の自重 (kN/m) である。

【管の耐荷力】

$$Q_B = M_B / kr^2 \quad (3)$$

ここに、 Q_B :管の耐荷力 (kN/m²)、 k :支承係数（ここでは砂基礎 120°とし、0.275を採用）である。

【死荷重（鉛直土圧）】

$$w = \gamma H \quad (4)$$

ここに、 w :管に作用する土圧 (kN/m²)、 γ :埋め戻し土の単位体積重量 (kN/m³)、 H :土被り (m) である。

【活荷重（交通荷重）】

$$P = \frac{2P(1+i)\beta}{C(\alpha+2H \tan \theta)} \quad (5)$$

ここに、 p :活荷重 (kN/m²)、 P :T荷重 (kN、ここでは100を採用)、 i :衝撃係数、 β :断面力低減係数 (0.9を採用)、 C :車体占有幅 (m、2.75を採用)、 α :車輪設置長さ (m、0.2を採用)、 θ :分布角 (45°) である。

【作用荷重】

$$Q = w + p \quad (6)$$

ここに、 Q :作用荷重 (kN/m²) である。

【管の安全率】

$$F_B = Q_B / Q \quad (7)$$

ここに、 F_B :管の安全率である。

7. 現場測定結果

実現現場で得られた周波数分布と高周波成分比を図6に示す。図中には衝撃弾性波法による測定と同時に実施したTVカメラによる内面視画像も記載した。

図より、内面に異常の見られなかった管の周波数分布は新管と同程度であることがわかる。劣化が生じた場合、周波数分布において低周波数領域に主な成分が移動することが確認でき、高周波成分比は小さくなる。この傾向は劣化が大きくなるほど顕著であり、実験で得られた傾向と一致する。このため、現場管について衝撃弾性波法による劣化評価は可能であることが明らかとなった。

次に、現場取得データから管の耐荷性能を算定した。その結果を図7に示す。土被りを1.27mとして計算し、その他条件は式(2)～(7)にしたがった。

図7から、管の埋設状態における安全率が確認できる。本例では安全率1.0未満のものは1本である。新管と同等の管の場合安全率は2.7程度であることから、劣化が生じている管は全て性能が低下しているものと考えられる。なお腐食Cについては破壊荷重値が規格を上回るものであったが、新管と同等の管の破壊荷重値に比べて小さく計算されており、劣化の影響として反映されている。このような性能低下度合いの定量的判断は目視では困難であり、衝撃弾性波法の利

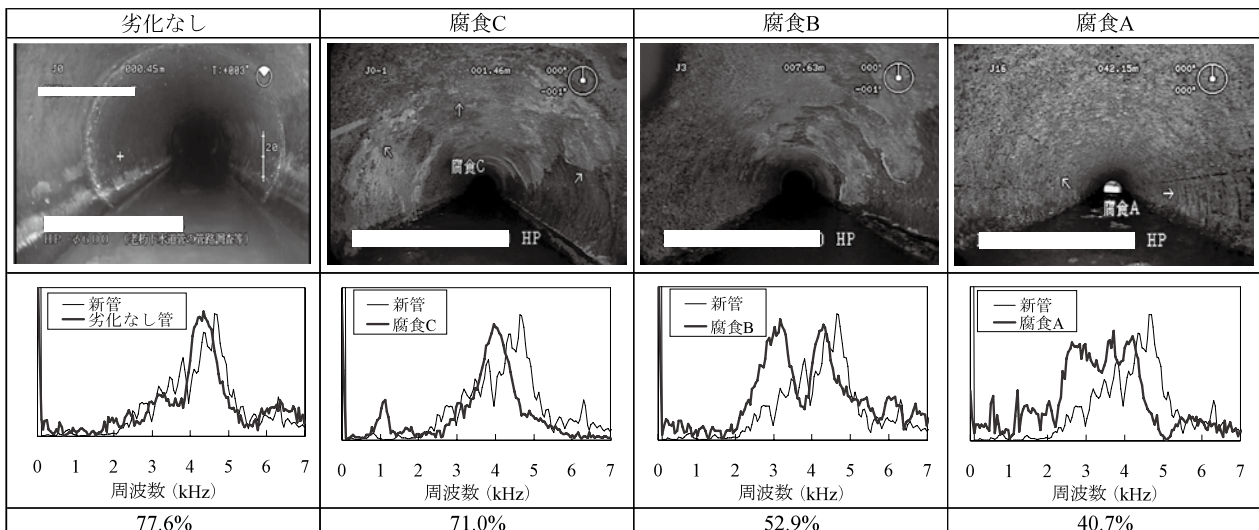


図6 現場測定で得られた周波数分布と高周波成分比の代表例 (φ 600)

点である。

衝撃弾性波法では高周波成分比による管の劣化程度評価に加え、破壊荷重値の算出や、現場条件を考慮した安全率の計算が可能であり、対策の優先順位や管更生実施の決定および工法の選定に活用可能であるものと考えられる。

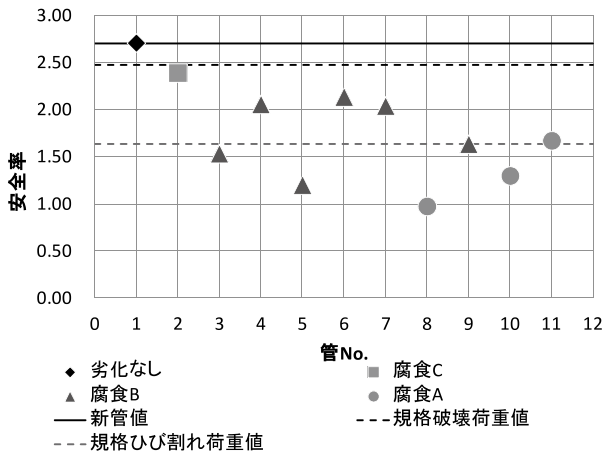


図7 安全率計算結果

8. 破壊荷重値の推定結果と実測結果の関係

耐荷性能等を計算する場合には、破壊荷重値の取得が必須となる。埋設された管に対して測定した結果から計算された破壊荷重値と、実際に管を掘出して破壊試験を行った結果について比較を行った。

図8に全ての管で得られた破壊荷重値を示す。なお参考のため、φ200～φ700にて実験で得られた結果も記載した。

推定値は実測値に対して一定のばらつきを有している。経年管のデータについては、模擬管における傾向と概ね一致しており、ばらつきの範囲もほぼ同等であると考えられる。この結果から経年管について模擬管実験の結果が適用可能であるものと考えられる。

このことから、衝撃弾性波法により計算された推定破壊荷重値を用いた耐荷性能の計算には妥当性があるものと考えられる。

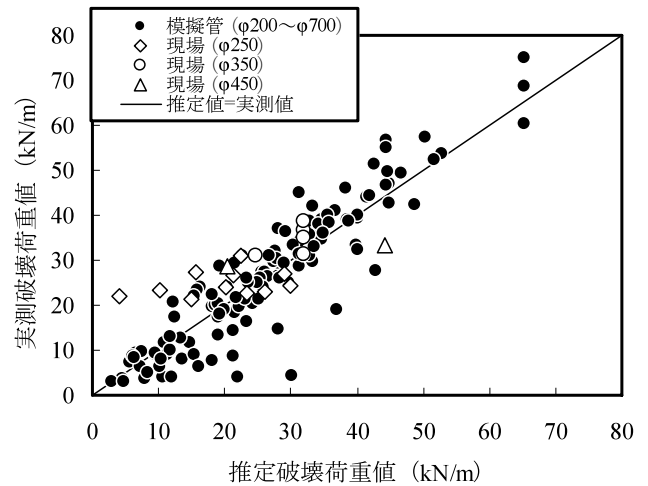


図8 破壊荷重値の比較

9. おわりに

本稿では、下水道管渠における劣化診断について、非破壊検査方法である衝撃弾性波検査法を活用した手法を検討した。その結果、既設管の劣化を定量化するのみならず、管厚や破壊荷重値といった管の物理的特性値が推定できることが実験結果より明らかとなった。さらに、本技術を現場に適用した結果、腐食環境下にある管渠について、劣化程度に応じた数値結果であったことが確認できた。また、管の埋設状態における安全率を計算した結果、目視結果では評価困難である安全性を数値評価することが可能であった。

このように、模擬管で得られた知見が現場の管渠の調査・診断で有効であることが確認できた。

今後は、技術の信頼性を向上させることを目的として、現場におけるデータ取得を実施すること、衝撃弾性波検査法で推定された値の信頼性向上を目的として、掘出し管の試験を実施し整合性を確認することで検査法をレベルアップさせていく予定である。

<参考文献>

- 1) 公益社団法人日本下水道協会:平成22年度版下水道統計、p.61、2012
- 2) 新井智明:下水道施設のストックマネジメントと下水道長寿命化支援制度、下水道協会誌、Vol.47、No.568、pp.4-7、2010.2
- 3) 社団法人日本下水道協会:下水道管路施設の緊急点検実施マニュアル(案)、2007.3