

衝撃弾性波法による管路診断に関する 共同研究

研究第二部 主任研究員

井藤 元暢



1 はじめに

下水道整備の急速な進展に伴い、これまで整備された管路延長は約40万kmを超えている。今後、膨大な管きよストックを対象に適切な長寿命化計画を策定していく必要があり、管きよの定量評価の必要性が増加している。

本研究は、非破壊検査法の一つである衝撃弾性波法を下水道管きよの劣化診断に活用するために、その解析原理や適用性を明確にし、調査・解析・診断方法、並びに結果の利用方法を「技術資料」として取り纏めたものである。

なお、本研究は、平成21年11月から平成24年3月の期間で、積水化学工業(株)、ペンタフ(株)、および本機構の3者の共同研究として実施したものである。

2 技術の概要

(1) 衝撃弾性波検査法の特徴

衝撃弾性波検査法は、既設管の構造的に重要な変状を、非破壊・非開削の条件で、定量的に評価できることが特徴である。また、衝撃弾性波検査法では、TVカメラ調査結果を踏まえた総合判定を行い、最終的な診断結果とする。衝撃弾性波検査法による管路診断のイメージを図-1に示す。

衝撃弾性波検査法は、呼び径200~700mmの鉄筋コンクリート管 (JSWAS A-1 および JIS A5372) 対象としている。

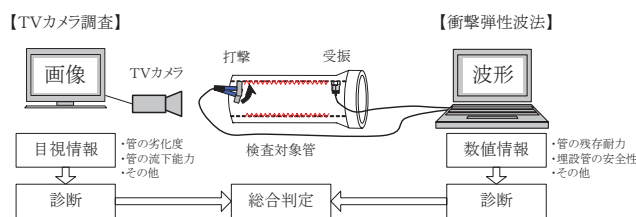


図-1 衝撃弾性波検査法のイメージ

(2) 調査機器と方法

衝撃弾性波検査法の調査のイメージを、図-2に示す。衝撃弾性波法の検査ロボットは、図-3に示すように打撃部 (インパルスハンマ) と受振部 (加速度センサ) を搭載したロボットである。

打撃部と受振部にそれぞれCCDカメラが搭載されており、打撃部 (インパルスハンマ) および受振部 (加速度センサ) 等の位置 (測定位置) や動作状況、

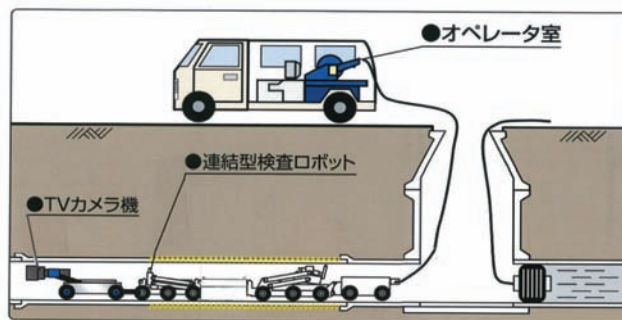


図-2 衝撃弾性波検査法の調査のイメージ

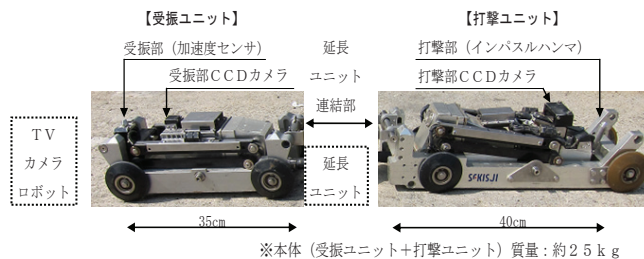


図-3 衝撃弾性波ロボット

管壁の状態等が確認できる。

また打撃部と受振部間は、測定管の長さ（2.00mまたは2.43m）に応じた延長ユニットで接続される。

なお、衝撃弾性波ロボットには、自走能力がないため、TVカメラロボットに牽引されて、管内を走行する。

(3) 検査およびデータ処理方法

衝撃弾性波ロボットを用いて、管の頂部端を打撃することで発生した弾性波を他端に押し付けた受振センサで受信する。受信波形を変換して周波数分布図を作成し、「高周波成分比」を算出する。（図-4参照）

「高周波成分比」は、図-5に示すように周波数分布図における全周波領域の成分量に対する高周波領域の成分量の比率として定義され、検査対象管の周波数分布特性を代表する指標値としている。

高周波成分領域の範囲（3.5～7.0kHz）は、図-6に示すように劣化管（減肉管や軸方向クラック管）における周波数スペクトルが健全管と比較して3.5kHz以上の領域の成分量が少なくなる傾向にあること等か

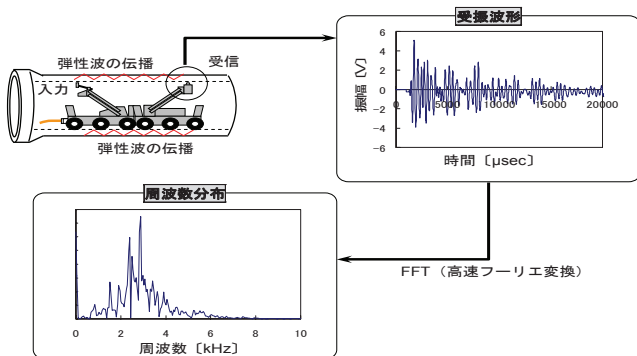
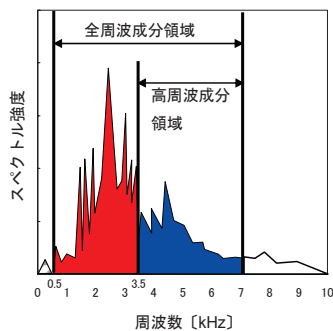


図-4 受振波形と周波数分布図の例



全周波成分量 = 赤 + 青 : 0.5～7.0kHz 区間の面積
 高周波成分比 = 青 / (赤 + 青) : 3.5～7.0 区間の面積 / 0.5～7.0kHz 区間の面積

図 2-9 周波数分布の数値化方法

図-5 周波数分布図の例

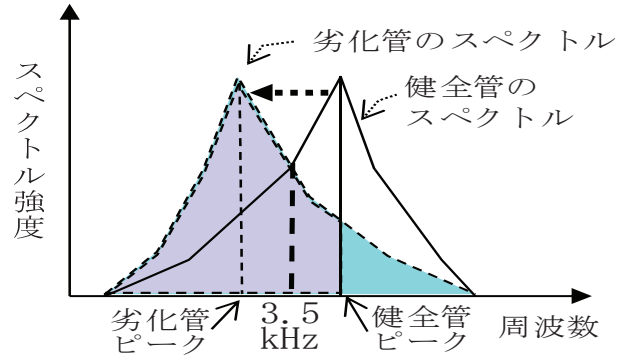


図-6 劣化管の周波数分布の例

ら、経験上定めたものである。

(4) 評価可能な劣化事象

衝撃弾性波検査法における高周波成分化は、管の構造上重要な劣化事象（減肉、軸方向クラック）の有無とその異常の程度を管1本ごとの平均的な状態として応答する。

衝撃弾性波検査法で評価可能な劣化事象について、TVカメラ調査と比較した結果を表-1に示す。

衝撃弾性波検査法は、TVカメラ調査では発見できない管の外面の劣化事象や管の内面であっても視認不可能な初期の劣化事象を捉えることができるとともに、後述する衝撃弾性波検査法による管の健全度や安全度を用いて定量的に評価できることが特徴である。

なお、衝撃弾性波検査法では、「高周波成分比」の低下のみを指標としていることから、検査結果から劣化事象の特定（例えば、減肉と軸方向クラックのどち

表-1 衝撃弾性波検査法で評価可能な劣化事象

項目	劣化位置	衝撃弾性波検査法	TVカメラ調査
腐食	減肉	内面 ○ (定量) *局所的な劣化△	○ (定性) *局所的な劣化○
	外面	○ (定量) *局所的な劣化△	× (視認不可)
破損	軸方向クラック	内面 微小クラック ○ (定量)	× (視認不可)
		上記以外	○ (定性)
	外面 (側面)	○ (定量)	× (視認不可)
欠落	-	*△ (管頂のみ)	○ (定性)
管の周方向クラック		△	○
上下方向のたるみ		×	○
浸入水		×	○
取付け管の突出し		×	○
油脂の付着		×	○
樹木根侵入		×	○
モルタル付着		×	○

らが原因であるか等) はできない。また、管の流下能力や浸入水については評価できないことから、これらの項目はTVカメラ調査が必要である。

(5) 衝撃弾性波検査法による管路診断の手順

衝撃弾性波検査法による管路診断は、以下の手順で実施される。

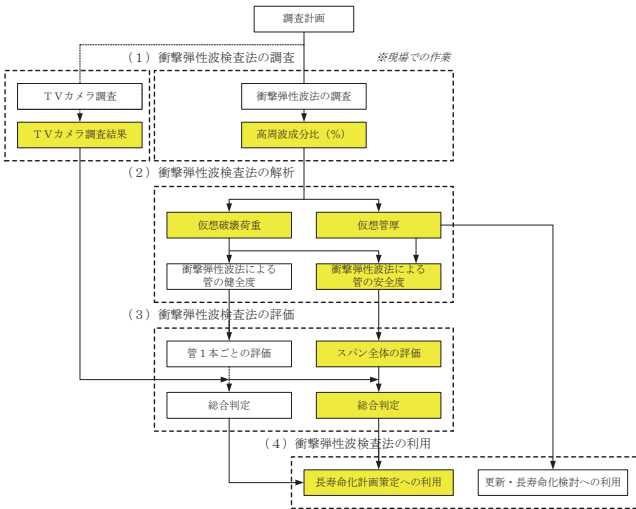


図-7 衝撃弾性波法による管路診断の手順

衝撃弾性波検査法による管路診断は、管路内調査で得られた管の劣化に関する検査データ（高周波成分比）から管の耐荷力や埋設安全性に関する指標値を算出する。これらの指標値を用いて管1本ごとやスパン全体の評価を行うとともに、TVカメラ調査の結果を踏まえた総合判定を行う。衝撃弾性波検査法による管路診断の結果は、長寿命化計画策定等に利用される。

3 衝撃弾性波検査法の解析方法

(1) 仮想管厚と仮想破壊荷重

調査で得られた「高周波成分比」を衝撃弾性波検査法の解析に使用する基礎数値として、仮想管厚と仮想破壊荷重を算出する。ここに、仮想管厚とは、管の耐荷力に有効な部材厚（管厚）であり、減肉や軸方向クラック等の劣化事象を仮定の管厚に置き換えて評価したものである。(図-8参照)

また、仮想破壊荷重は、仮想管厚相当の健全な部材断面を有する管の耐荷力を表したもので、減肉や軸方

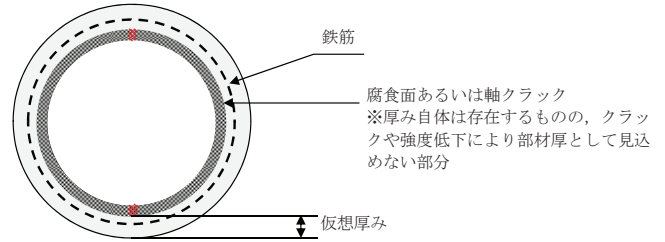


図-8 仮想管厚の概念

向クラック等の劣化事象について、その管が有する仮想の耐荷力として評価したものである。なお、劣化事象が減肉のみの場合、仮想破壊荷重は実破壊荷重（外圧強度の試験値）に近い値を示すが、劣化事象が軸方向クラック（減肉との複合事象を含む）の場合は、実破壊荷重とは一致しない。

これらの仮想管厚と仮想破壊荷重は、管径別に製作した3~4段階の減肉管を用いた基礎実験から得られた高周波成分比(%)と管厚(mm)並びに破壊荷重(kN/m)との関係式に、調査で得られた「高周波成分比」を代入することで求められるもので、一定の誤差を有するものである。図-9にφ300mmの基礎実験における高周波成分比と外圧強度試験で得られた破壊荷重値との関係を示す。

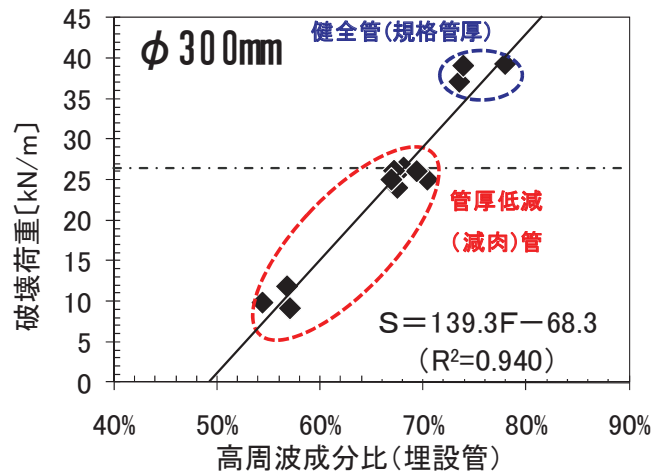


図-9 高周波成分比と破壊荷重との関係 (φ300mm)

仮想破壊荷重の算定方法を次式に示す。

$$S = c \cdot F + d \quad \dots\dots\dots(1)式$$

ここに、S: 計算された仮想破壊荷重 (kN/m)

F: 高周波成分比 (%)

c, d: 基礎実験より決定された係数

表一 2 仮想破壊荷重の推計式における係数一覧

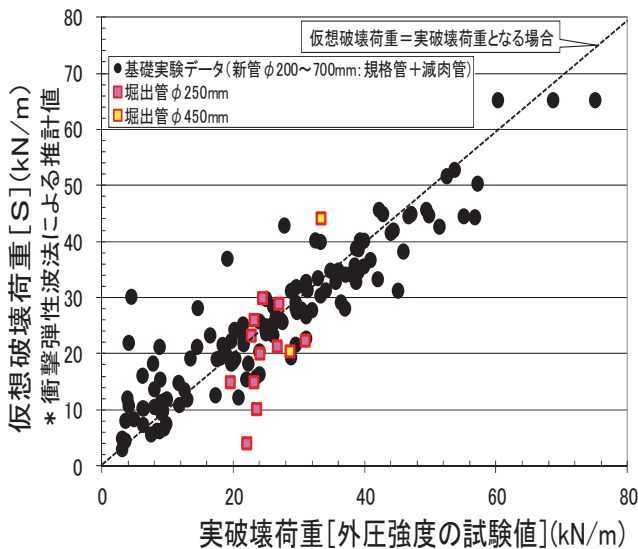
呼び径 (mm)	係数		備考
	c	d	
200	63.9	-22.6	$R^2=0.822$
250	61.4	-19.3	$R^2=0.892$
300	139.3	-68.3	$R^2=0.940$
350	114.5	-49.9	$R^2=0.783$
400	142.4	-54.5	$R^2=0.871$
450	107.9	-23.1	$R^2=0.844$
500	172.3	-71.3	$R^2=0.763$
600	94.5	-18.3	$R^2=0.755$
700	223.3	-83.3	$R^2=0.797$

*基礎実験のデータ数はφ200~350mmが12、φ400~700mmが15

基礎実験で使用した規格厚みの管並びに減肉管の実破壊荷重と仮想破壊荷重との関係を図一10に示す。また、同図には、掘出し経年管のデータも併せて示した。同図より、仮想破壊荷重は、実破壊荷重と比較して一定の誤差を有していることがわかる。また、掘出し管のデータもばらつきが見られるが、概ね基礎実験のばらつきの範囲内であることから、新管を用いた基礎実験のデータが経年管についても適用可能であることを裏付けている。なお、掘出し管の中で、仮想破壊荷重が実破壊荷重を大きく下回るデータがあるが、これは軸方向クラックによるものと推察された。なお、「技術資料」では、これら推計式の誤差範囲を呼び径別に示している。

(2) 管の診断指標

仮想管厚や仮想破壊荷重を基にして、次の①、②に定義する管の診断指標を求める。



図一10 実破壊荷重と仮想破壊荷重との関係

① 衝撃弾性波検査法による「管の健全度」

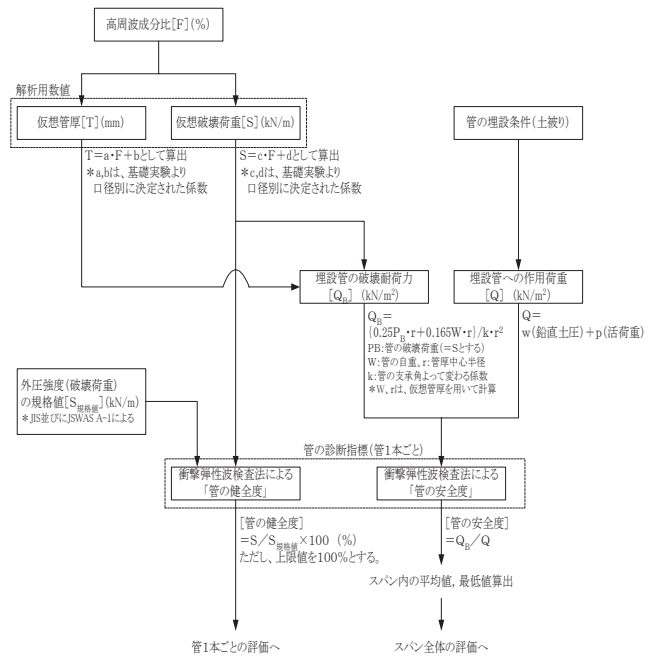
管の健全度は、検査対象管の残存耐力に着目したもので、JIS並びにJSWASにおける外圧強度（破壊荷重）の規格値を100%として指標化したものである。

② 衝撃弾性波検査法による「管の安全度」

管の安全度は、検査対象管の埋設状態における安全性に着目したもので、管が有する耐荷力を、その作用荷重に対する安全率として指標化したものである。

これらの指標値の算出方法を、図一11に示す。

なお、いずれの指標値も仮想管厚や仮想破壊荷重を基に計算されるため、その誤差範囲を含んだ指標となることから、本指標を用いた評価（管の診断）においては、この誤差範囲を適切に考慮する必要がある。



図一11 衝撃弾性波検査法の解析手順

4 衝撃弾性波検査法の評価方法

(1) 評価の考え方

管の診断は、管1本ごとの評価とスパン全体の評価に大別される。

管1本ごとの評価については、埋設条件の影響を受けない管の劣化状態そのものを評価することが重要であるため、衝撃弾性波検査法による「管の健全度」を用いる。一方、スパン全体の評価については、スパン

全体の異常の程度診断と緊急度の判定をスパンごとに行う必要があるが、この場合、管の有する耐荷力が当該管の受ける作用荷重に対して十分であるか否か最も重要であることから、衝撃弾性波検査法による「管の安全度」を用いることとした。

ここでは、スパン全体の評価方法について、以下に示す。

(2) スパン全体の評価

衝撃弾性波検査法によるスパン全体の評価は、スパン全体の「管の安全度」の平均値を求め、その度合により緊急度をランク付けして判定する。なお、「管の安全度」は、スパン全体の平均値と併せてスパン全体の最低値も明記することとし、管1本であっても「緊急度Ⅰ」相当となるものについては、対策範囲の検討を個別に行い、修繕（スパン未満）か改築（スパン単位）を決定する。スパン全体の緊急度の判定基準の例を表-3に示す。

表-3 スパン全体の緊急度の判定基準（例）

緊急度	定義	衝撃弾性波検査法による管の安全度 $[F_B]$		説明
		基準値	判定値	
I	速やかに措置が必要な場合	$1.0 > F_B$	割増係数 1.25 \Rightarrow $1.25 > F_B$	管の有する破壊耐荷力が、管に作用する荷重を下回り、管の安全性が損なわれている状態
II	簡易な対応により必要な措置を5年未満まで延長できる場合	$1.25 > F_B$ ≥ 1.0	割増係数 1.25 \Rightarrow $1.6 > F_B$ ≥ 1.25	管の有する破壊耐荷力が、管に作用する荷重を上回るものの、一般的な安全率を満足できていない状態
III	簡易な対応により必要な措置を5年以上に延長できる場合	$2.0 > F_B$ ≥ 1.25	割増係数 1.25 \Rightarrow $2.0 > F_B$ ≥ 1.6	管の破壊耐荷力が作用荷重を上回り、かつ一般的な安全率を満足できるが、終局限界状態に対する十分な安全係数を確保できない状態
なし	衝撃弾性波検査法において異常が認められないもの	$F_B \geq 2.0$	\Rightarrow $F_B \geq 2.0$	管の破壊耐荷力が作用荷重を上回り、かつ終局限界状態に対する十分な安全係数を確保できる状態

※仮想破壊荷重並びに仮想管厚の誤差範囲を考慮した仮想破壊耐荷力QB誤差考慮と誤差範囲を考慮しない通常の仮想破壊耐荷力QBとの比率QB誤差考慮/QB=1.25から、誤差範囲を考慮した緊急度の判定基準を算定した例

(3) TVカメラ調査結果との総合判定

衝撃弾性波検査法では、TVカメラ調査結果との総合判定を行い、スパン全体の異常の程度や緊急度を最終的に評価する。総合判定方法の例を、図-12に参考に示す。

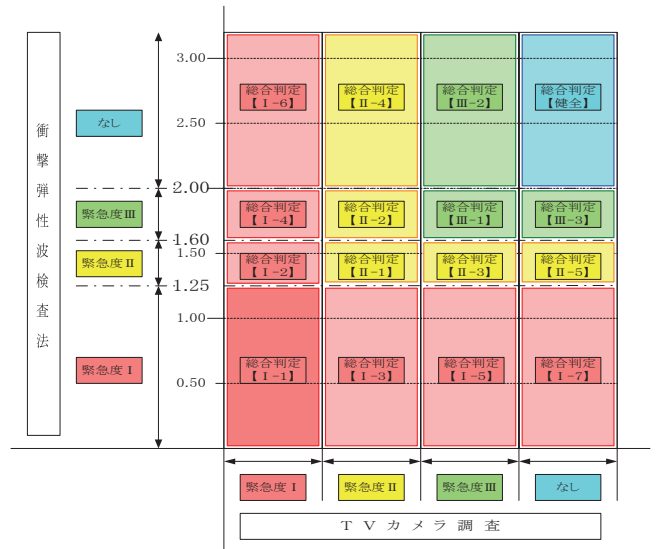


図-12 総合判定方法（例）

5 おわりに

従来のTVカメラ調査結果に、衝撃弾性波検査法による定量的評価を加えることで、対策範囲の検討（改築か修繕か）や更新・長寿命化対策の検討（布設替えか更生工法か）において、より総合的な判断が可能となる。また、衝撃弾性波検査法では、仮想管厚や仮想破壊荷重等の既設管の耐荷力に関する数値データが得られることから、更生管の工法選定等への利用も期待できる。そこで、「技術資料」（資料編）に、衝撃弾性波検査法を活用した複合管の構造解析手法の手順並びに計算例を参考に示した。

衝撃弾性波法による管路診断では、構造上重要な管の変状に関する定量的な数値指標を取得できることやTVカメラ調査では発見できない管の外の変状を捉えることが出来る等の多くの特徴を有している。また、衝撃弾性波検査法による管の診断指標は、実証実験から求めた関係式を用いて算出され、一定の誤差を有した数値であるが、今後、衝撃弾性波検査法の検査データが蓄積されることで、より精度の高い既設管の耐荷力の評価が可能となることを期待している。

衝撃弾性波法による管路診断により、安全で効率的な下水道長寿命化計画の策定に寄与できれば幸いである。