## 論文 コンクリート下水管路の劣化診断における衝撃弾性波法の適用

舟橋 孝仁<sup>\*1</sup>·鎌田 敏郎<sup>\*2</sup>·皆木 卓士<sup>\*3</sup>·浅野 雅則<sup>\*4</sup>

要旨:コンクリート下水管路の劣化診断手法として,衝撃弾性波法による検討を行った。ここでは,実際の下水管に発生にする劣化を想定した供試体を用いて,劣化状態と評価パラメータ(最大振幅値比,波形減衰時間比および周波数分布)との関係について検討を行った。さらに,簡易的な3次元モデルを用いて解析的検討も加えた。その結果,最大振幅値比,波形減衰時間比および周波数分布は,管軸方向に存在するひび割れにより影響を受けるパラメータであることが明らかとなった。また,管厚の減少を評価するには,波形減衰時間比および周波数分布を用いることが有効であることがわかった。

キーワード:コンクリート下水管路,衝撃弾性波法,最大振幅値,波形減衰時間,周波数分布

1. はじめに

コンクリート下水管路の劣化診断を適切に行う ことは,社会基盤のメインテナンスの面から極め て重要な課題である。下水管に生じる劣化として は,硫化水素によるコンクリートの腐食に起因す る管厚減少や,荷重の作用により軸方向および周 方向に発生するひび割れがある。このような劣化 に対する診断方法として,現状ではテレビカメラ を搭載した台車を用いた点検が行われている<sup>1)</sup>。

しかしながら,得られる情報は下水管内部の画 像のみであるため,判断においては個人差が現れ やすく,定量的な評価を下すことは困難であると 考えられる。また,この方法はコンクリート表面 における情報のみであるため,たとえば,ひび割 れの存在などを大まかに把握することはできても, コンクリート管の厚さ方向の変化を評価すること は困難である。さらに,特に小口径の下水管(直 径が200~600mm 程度)では,直接人間が管内に 入って検査を行うことができないなど,制約条件 が多いのが現状である。

このような背景から,著者らは非破壊試験法として衝撃弾性波法に着目した検討を行っている<sup>2)</sup>。

そして,これまでに,下水管に発生するひび割れ 評価にはパラメータとして周波数分布が有効であ ることをすでに明らかにしている。しかしながら, 管厚の評価方法については,未検討の部分が残さ れていた。一方,弾性波の評価パラメータとして は,周波数分布の他にも波形から得られる最大振 幅値や波形減衰時間等があり,これらの指標によ る劣化の評価方法も検討を追加することは重要と 考えられる。

そこで本研究では,下水管の定量的劣化評価手 法の構築を目的として,周波数分布に加えて波形 パラメータ(最大振幅値および波形減衰時間)を 用いた検討を行った。対象とした劣化現象は,管 軸方向のひび割れの発生および管厚の減少とし, 各パラメータと劣化程度との関係を考察した。ま た実験に加えて3次元 FEM 解析を行い,パラメ ータの変化要因とその程度を解析的に検討した。

2. 実験概要および解析概要

2.1 供試体

本研究では,図-1 に示すような鉄筋コンクリ ート製下水管(長さ1000mm,内径250mm,管厚

- \*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)
- \*2 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

\*3 積水化学工業(株) 環境・ライフラインカンパニー 京都研究所 工修 (正会員)

\*4 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 工修 (正会員)

表 - 1 供試体種類

	供試体種類	長さ(mm)	管厚(mm)	劣化の程度
А	軸クラック少	1000	28	管軸方向に 4~5 本のひび割れ
В	軸クラック多	1000	28	管軸方向に 8~10 本のひび割れ
С	管厚 23mm	1000	23	骨材露出程度を想定
D	管厚 14mm	1000	14	鉄筋露出程度を想定
Е	健全	1000	28	





図 - 1 弾性波の入力と受振の位置関係

28mm)を用いた。実験で用いた供試体は,表-1 に示すように,管厚が28mmで,軽い衝撃力によ り人工的に管軸方向に対してひび割れを導入した 供試体2パターン(表中のAおよびB),製作時 点であらかじめ管厚を減少させた供試体2パター ン(表中のCおよびD)および比較のために用い た健全供試体(表中のE)の計5種類である。な お,管周辺の埋設条件等が劣化評価に与える影響 については既報<sup>2)</sup>において検討済みであるため, 本研究では,供試体は図-1 に示すように厚さ 150mmの砂層上に設置した。

2.2 弾性波計測方法

(1) 弾性波の入力および受振方法

弾性波の入力は,直径 30mm の鋼球を高さ 10cm の位置から落下させることにより行った。弾性波 の受振には,加速度計(周波数範囲:0.2~45kHz) を用いた。加速度計は両面テープにより供試体表 面に固定した。加速度計により受振された波形は アンプを介し高速波形収集システム(AD 変換器) によりデジタル信号に変換した後パソコン上に記 録した。本研究では,受振波形に対して FFT(高 速フーリエ変換)により周波数分布を求めるとと

図 - 2 最大振幅値および波形減衰時間

もに,波形パラメータ(最大振幅値および波形減 衰時間)の抽出を行った。図-2 に示すように, 最大振幅値は,受振波形において振幅の絶対値が 最大を示す振幅値であり,波形減衰時間は,振幅 が最大値に到達した後,最後にしきい値(最大振 幅値の30%)を交差するまでの時間として定義し た。打撃位置および受振位置は,図-1 に示すよ うに下水管外面上部とした。打撃は,下水管外面 の端部より軸方向に 100mm 内側の点とし,受振 位置は,もう一方の端部より 100mm 内側の箇所 とした。なお打撃および受振は,下水管外面にお いて同一直線上とした。また,弾性波計測は各ケ ースについて3回ずつ行った。

2.3 FEM 解析

解析では,実験結果と比較するため,供試体と 同じ寸法の3次元モデルを用いた。モデルは弾性 体(弾性係数:40GPa,ポアソン比:0.2,密度: 2.3g/cm<sup>3</sup>)とした。解析では実験で用いた供試体 に生じているひび割れを忠実に再現することは極 めて困難であるため,簡易的なモデルとして,図 - 3(a)に示すように,モデル軸方向に長さ 1000mmのスリットを設けることによりひび割れ



(a)軸クラックモデル (b)健全および管厚減少モデル図 - 3 解析モデル

をモデル化した。表 - 1 の A および B に対応する モデルとして,軸クラック少ではスリットを3本 とし,軸クラック多ではスリットを6本とした。 また,分離したモデルを弾性バネを設けて結合し た。健全および管厚減少モデルは,図-3(b)に示 すようなモデルとし,厚さのみを28,23 および 14mmの3パターンに変化させたモデルを用いた。 境界条件は,簡単のためにモデル下面における節 点の鉛直方向変位を固定した。

衝撃荷重は, 図-4 に示す波形で入力した。図 中の荷重の継続時間および最大荷重は,それぞれ 既往の知見<sup>3),4)</sup>を参考に決定した。入力位置は実 験と同様の位置とした。解析においては,実験に おいて加速度計を設置した位置と同じ位置におけ る鉛直方向の時刻歴応答波形を算出した。波形パ ラメータの抽出を行うとともに,FFT により周波 数分布を求めた。なお,解析における計算時間間 隔は 10 μ s とし,出力データ数を 1024 とした。

3. 実験結果および解析結果

- 3.1 ひび割れ程度がパラメータに与える影響
- (1) 最大振幅值比

図 - 5 に,実験および解析で得られた,健全お よび軸クラック(多および少)供試体の受振波形 を示す。続いて,図 - 6 に,実験で得られた最大 振幅値比を示す。ここで,最大振幅値比とは,健 全供試体で得られた最大振幅値に対する比として 定義した。これによると,管軸方向にひび割れが 存在する場合,健全供試体と比較して最大振幅値 比は小さくなり,さらにひび割れ発生量が大きい

ほどこの値は小さくなることがわかる。これは、 健全供試体と比べて打撃により管に発生した振動 の伝達するエネルギが、ひび割れの存在により減 少するため,結果として受振波形の最大振幅値比 が小さくなったものと考えられる。実験結果にお いて軸クラック多と軸クラック少とを比較すると、 クラック多の場合はクラック少の場合と比較して, 最大振幅値比が31%減少している。これに対して, ひび割れをモデル化した解析は,分割された部材 をバネでつなぎ合わせたモデルであるため,解析 値における健全供試体とひび割れ供試体での比較 はできないものの,解析においてもクラック多は クラック少と比較すると最大振幅値比は30%減少 している。したがって,管に存在するひび割れは 波形における最大振幅値比に影響を与えることが 明らかであり、このパラメータに着目した下水管 のひび割れ評価が可能であると考えられる。この ことから,最大振幅値比は,管軸方向に存在する ひび割れの有無および程度により影響を受けるパ ラメータであることが明らかとなった。

図-4 入力波形

(2)波形減衰時間比

図 - 5 によると,ひび割れの存在により,波形 の減衰時間が小さくなっていることが明確にわか る。この傾向を定量的に把握するために,図-7 に,実験で得られた波形減衰時間比を示す。ここ で,波形減衰時間比とは,健全供試体で得られた 波形減衰時間に対する比として定義した。これに よると,軸クラック少および軸クラック多供試体 では,健全供試体と比較して波形減衰時間比が小 さくなっている。これは,管軸方向にひび割れを



有する場合、ひび割れにより分割された大きさ(質 量)の異なるコンクリート部分が,打撃によって それぞれ振動するものの,互いに干渉し合い,減 衰時間比が小さくなったためと考えられる。この 現象は,連成振動における相互作用<sup>5)</sup>によるもの と考察できる。また,本研究の範囲内では,支持 条件および打撃によるエネルギを考慮すると,管 が円環の曲げ振動モード(円環の基本モード)<sup>6)</sup> で,振動したものと考えられる。クラック多およ び少の実験値における比較では, クラック多の場 合は少に比べて波形減衰時間比は81%減少してい る。これに対して,解析においては減少率は37% と,実験値と比較すれば減少率が小さくはなって いるものの、ひび割れ程度の差による影響は明確 に現れている。以上のことより,波形減衰時間も 最大振幅値と同様ひび割れの存在およびその程度 の評価に有効であることが示された。

(3)周波数分布

図 - 8(a)および(b)に実験および解析で得ら れた周波数分布をそれぞれ示す。図 - 8(a)によれ ば,実験ではひび割れが存在することにより,周 波数分布は低い周波数領域を中心とする分布形状 になっていることがわかる。軸クラック多の場合 ではよりその傾向が顕著となっており,健全やク



ラック少の場合と比較しても,特に 6kHz 以上の 周波数成分はほとんど見られない。これに対して 解析結果をみると,周波数分布の形状自体は実験 とは異なるものの,ひび割れが存在した場合はよ り低周波の周波数領域に主な成分が分布している ことや,ひび割れ量が大きくなるほど低周波の成 分がさらに増加し高周波領域の成分が減少する傾



向は一致している。以上の結果より,周波数分布 における低周波成分の割合の増加に着目すれば, ひび割れの有無および程度を把握できると考えら れる。

3.2 管厚の変化がパラメータに与える影響

(1) 最大振幅値比

図 - 9 に実験および解析で得られた最大振幅値 比を示す。これによると,実験および解析結果と もに,管厚23mm供試体は,健全供試体と比較し て,増加していることがわかる。一方,管厚14mm 供試体では,実験結果と解析結果の差が大きくな っており,実験結果は,健全供試体と比較して小 さくなっているものの,解析結果では殆ど変化が みられなかった。管の厚さが減少した場合では、 その影響により衝撃に対する抵抗が小さくなるた め,波形における最大振幅値は大きくなることが 考えられるが、本実験および解析結果では、これ に起因する顕著な差は見られなかった。これは, 対象とする部材が円管であるため、単純な板の場 合とは異なり厚さの違いによる影響が最大振幅値 に現れにくいためと考えられる。したがって,本 研究の範囲内では,最大振幅値比は管厚の減少に 対しては感度が低いパラメータであるものと考え られる。



(2)波形減衰時間比

図 - 10 に実験および解析で得られた波形減衰 時間比を示す。これによると、実験および解析結 果ともに傾向が一致しており、管厚14mm供試体 は、健全供試体と比較して、顕著に増加している ことがわかる。これは、管厚の減少により、管全 体の剛性が低下したためと考えられ、打撃により 生じた振動の継続時間が大きくなったものと考え られる。しかしながら、管厚23mm供試体は、健 全供試体と比較して、明確な変化がみられなかっ た。管厚28mmと23mmの違いを確認するために、 実験と解析の波形を図 - 11 に示す。これによれば、 実験と解析では振幅の変動傾向に違いは見られる ものの,減衰の傾向は28mmと23mmを比較する とほとんど変化のないことがわかる。厚さの減少 により管の剛性は低下し,減衰時間は大きくなる ものと考えられるが,この範囲においては波形減 衰時間への影響が小さかったものと考えられる。 しかしながら,28mm供試体と14mm供試体との 間の差は明らかであり,波形減衰時間比は,本研 究の範囲内では,管厚が鉄筋露出程度まで減少し ていることを評価するのに有効なパラメータであ ると考えられる。

(3)周波数分布

図 - 12 に周波数分布を示す。これによると,実 験結果では,管厚23mm および管厚14mm 供試体 では,健全供試体と比較して,低周波成分が増加 する傾向がみられる。一方、解析結果においても, 実験結果における周波数分布の分布形状は異なる ものの,実験結果と同様の傾向が確認できる。こ れは,円環の曲げ振動では,内径の増加に伴って 固有振動数が小さくなる<sup>6)</sup>ことに対応した挙動で あると考えられる。本研究では管厚の減少に伴い 管の内径が増加するため,結果として低周波領域 の成分が卓越したものと考えられる。また,実験 および解析結果の周波数分布において,卓越する ピーク周波数の変化に着目すると,管厚23mm供 試体では健全供試体のピーク位置に比べ,若干高 周波側に移動していることがわかる。さらに,管 厚 14mm 供試体では,ピーク周波数は健全供試体 に比べ低周波側に位置している。このことから, 周波数分布を用いて、管厚の減少を捉えることは 可能であり,特に,低周波成分の割合の増加に着 目することが有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた結果を以下に示す。

(1)最大振幅値を用いた場合,管軸方向におけるひび割れの存在やその発生量を相対的に評価することが可能である。しかしながら最大振幅値は,管厚の減少に対しては感度の低いパラメータであることが明らかとな

った。

- (2)波形減衰時間は、管軸方向に存在するひび 割れの有無やその程度を評価するのに有効 であるとともに、管厚が半分程度まで減少 した場合に健全供試体と明確な差を生じる ことがわかった。波形減衰時間は、最大振 幅値と比較すると、管厚の変化を把握する のに有効なパラメータであると考えられる。
- (3)周波数分布は,ひび割れおよび管厚の減少のいずれの評価に対しても有効であることが明らかとなった。

謝辞 実験の実施およびデータ整理等に多大なる ご協力を頂いた岐阜大学学部生の中井喜一君に深 く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 社団法人日本下水道協会:下水道管路施設テレビカメラ調査マニュアル(案),2000
- 2)皆木卓士,鎌田敏郎,野崎善治,舟橋孝仁: 弾性波によるコンクリート下水管路の劣化診 断手法に関する基礎研究,コンクリート工学 年次論文報告集,Vol.24,No.1,pp.1539-1544, 2002
- 3) Sansalone M.J.and Streett W.B. : Impact-Echo , Bullbrier Press , Ithaca , N.Y. , 1997
- 4) 白鳥雅也, 桧貝勇, 岡村雄樹: 軽い衝撃荷重 を受けるコンクリート部材の応答解析, コン クリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.679-684, 1992
- 5) 高橋康英,奥津尚宏,小泉孝之:実用振動解 析入門,日刊工業新聞社,pp.160-165,1984
- 6)谷口修,田村章義:新版工業振動学,コロナ 社,pp.428-433,1984