論文　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

皆木　卓士[*1]・鎌田　敏郎[*2]・野崎　善治[*3]・舟橋　孝仁[*4]

要旨：コンクリート下水管路の劣化程度を簡易的に診断する非破壊試験法として，弾性波を用いる方法について基礎的な検討を行った。その結果，受振した波形の周波数特性を指標とすることによって，ひび割れの有無が把握できることを明らかにした。また，管の中央部よりも端部において受振を行い，かつ弾性波の入力点と受振点との距離をある程度確保した方がひび割れの特徴を捕らえやすいことを示した。さらに，砂中への埋設や管路内における水の存在がひび割れ評価に与える影響は小さいことを把握し，本手法の実際環境下への適用可能性について確認した。

キーワード：コンクリート下水管路，劣化診断，非破壊試験，弾性波法，ひび割れ，周波数特性

1.　はじめに

下水管路のメインテナンスは，一般のコンクリート構造物の場合と同様に今後の重要課題の一つである。

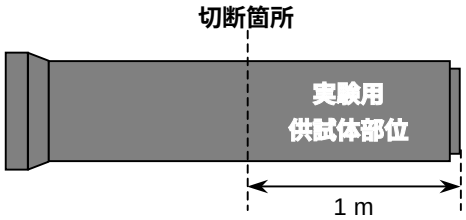
平成 12 年度の調査 [1)]によれば，わが国における下水管路の敷設延長距離は約 32 万 km にも達しており，そのうち約 8 割は管径 450mm 以下のものが占めている [2)]。この膨大な量の下水管路を合理的にメインテナンスしていくためには，構造物としての下水管路の特徴に応じた点検・補修・補強等のシステムを確立することが急務である。

下水管路の特徴としては，地中に埋設されているため点検に手間が掛かるだけでなく，より管径の小さいものでは，点検員が管内に入って直接目視によりひび割れの存在等を評価するのは困難である。そのため，テレビカメラを搭載した自走式の点検装置により診断が行われる場合 [3), 4)]があるが，得られる結果は表面の画像情報のみであり定性的で客観性に欠いている。

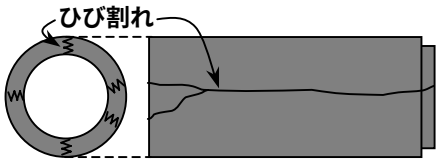
また，テレビカメラによる画像は，評価のためにポスト処理を必要とし，人手で画像を分析するため，経験や技術のほかに時間と費用も掛かる。そのため，より定量的で簡易的な診断方法の確立が望まれている。

そこで本研究では，新しい試みとして，衝撃による弾性波を用いた手法の検討を行った。衝撃による弾性波は，入力が容易であり，超音波と比べて低い周波数成分を多く含みエネルギーも大きいため，コンクリート中を伝播しやすい。また，受振された波形には，コンクリート管におけるひび割れ等の管全体としての劣化の情報が反映される。したがって，管内に侵入可能な規模の装置により弾性波の入力と受振を行い，取得波形から適切な評価パラメータを算定することができれば，定量的で客観的な判断指標となり得る可能性がある。さらに，本研究で対象とする下水管路の場合は，一般のコンクリート構造物と異なり，同形状・寸法の単体（既製品）を多数連結した構造となっているため，点検および評価においては，健全な単体での特性値（あるいは基準値：これは規格に基づいて製作された既製品であるから求めるのが容易である）を比較の対象として活用することによって劣化の判断を下すことが容易となる点において，このような手法が特に有効となるものと考えられる。

*1　積水化学工業㈱　環境・ﾗｲﾌﾗｲﾝｶﾝﾊﾟﾆｰ　京都研究所　修士（工学）（正会員）
*2　岐阜大学助教授　工学部土木工学科　博士（工学）（正会員）
*3　積水化学工業㈱　環境・ﾗｲﾌﾗｲﾝｶﾝﾊﾟﾆｰ　京都研究所　工修
*4　岐阜大学　工学部土木工学科　学部生



(a)供試体作製



(b)ひび割れ供試体のモデル図

図－1　供試体のモデル図

本研究では，この基礎的な実験として，まずコンクリート製ヒューム管に人工的にひび割れを導入した供試体を用いて，これを健全品と比較することにより検討を行った。そこでは，ひび割れの評価に適した弾性波の入力や受振の方法を検討し，評価に有効なパラメータを見出すことを試みた。さらに，埋設状態や水の存在など，管周辺の境界条件がひび割れ評価に与える影響についても検討を加えた。

2.　実験概要

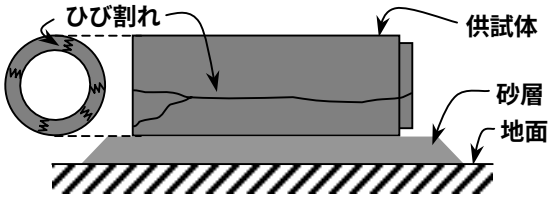
2．1　供試体概要

本実験では，JIS A 5303 遠心力鉄筋コンクリート管 B 型 1 種の規格により製造された呼び径 250mm のコンクリート製ヒューム管を，**図－1** に示すように端部から 1m の箇所で切断したものを使用した。また，劣化のモデル供試体としては，軽い衝撃力により人工的に管軸方向にひび割れを導入した供試体（主なひび割れ数は目視で 4～5 本である。以後，この供試体をひび割れ品とする。）を作製し，健全品と比較検討した。

2．2　弾性波計測概要

(1)　弾性波の入力および受振方法

弾性波の入力は，インパルスハンマを用いて行い，加速度センサ（周波数特性：0～8kHz）にて表面振動を受振した。また，電圧信号はそれぞれアンプを介し，高速波形収集システムによりパソコンにて記録した。この時，サンプリングタイムは 10μsec とした。なお弾性波の入力は，インパルスハンマにより得られる波形上で，打撃力および衝撃継続時間が毎回ほぼ一定となるよう確認しながら行った。供試体は**図－2 および写真－1** に示すように厚さ 150mm の砂層上に設置し，底面全面支持とした。

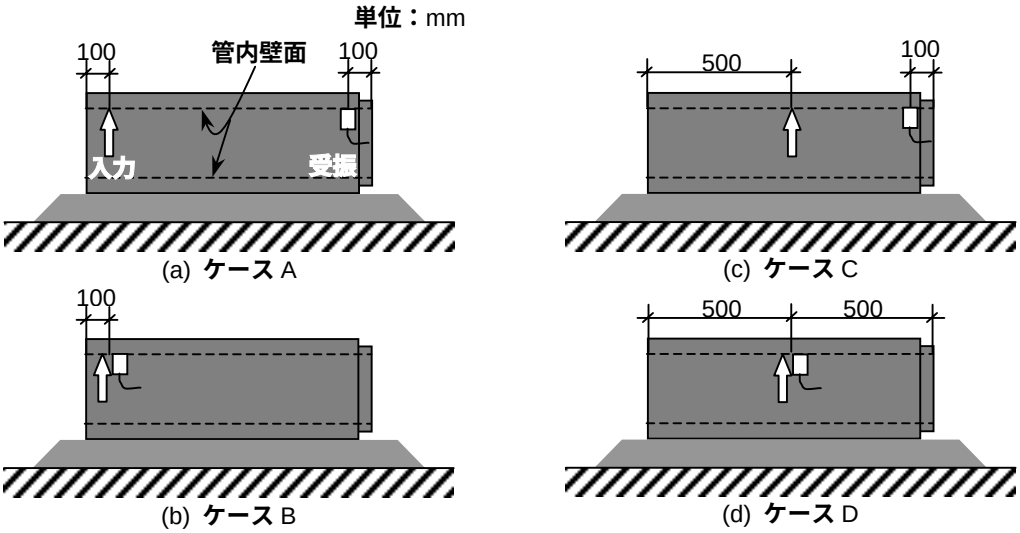


図－2　供試体の設置状況（ひび割れ供試体）

写真－1　供試体の設置状況

(2)　入力および受振の位置関係

弾性波の入力および受振の位置関係は，**図－3** に示すように A～D までの４つのケースを設け，健全品およびひび割れ品の両方について実験を行った。また，弾性波の入力および受振については，ともに管内側上部で行い，受振用の加速度センサは両面テープにて管壁面に接着固定した。ケース A（**図－3(a)**）では，入力は管の端部から軸方向に 100mm 内側，受振はもう一方の端部から軸方向に 100mm 内側の位置で行った。また，ケース B（**図－3(b)**）では，入力と受振は同じ位置で行い，ともに管端部から 100mm 内側の位置で行った。一方，ケース C（**図－3(c)**）では，入力は管端部から 500mm 内側，すなわち管中央部で行い，受振は管端部から 100mm 内側の位置で行った。さらに，ケース D



図－3　入力点および受振点の位置関係

（**図－3(d)**）では，入力と受振は同じ位置で行い，ともに管端部から 500mm 内側，すなわち，管中央部の位置で行った。なお，各ケースとも受振波形の再現性を確認するため，３回分の計測データを記録した。

(3)　本研究で使用する評価パラメータ

本研究では，高速フーリエ変換（FFT）により受振波形の周波数分布を求めた。結果の評価においては，ひび割れに起因する周波数分布の変化に着目するため，パラメータとして，最大ピークの周波数，および低・高周波領域の各成分比を考えた。ここで，低・高周波領域の各成分比は，本実験で使用した加速度センサの周波数範囲を考慮し，全体を 0～8kHz とし，低周波領域と高周波領域の区分境界を中間値である 4kHz に設定し，各区間にて積分値（周波数曲線下の面積）を算出した上でそれぞれ全体に対する百分率として算定した。

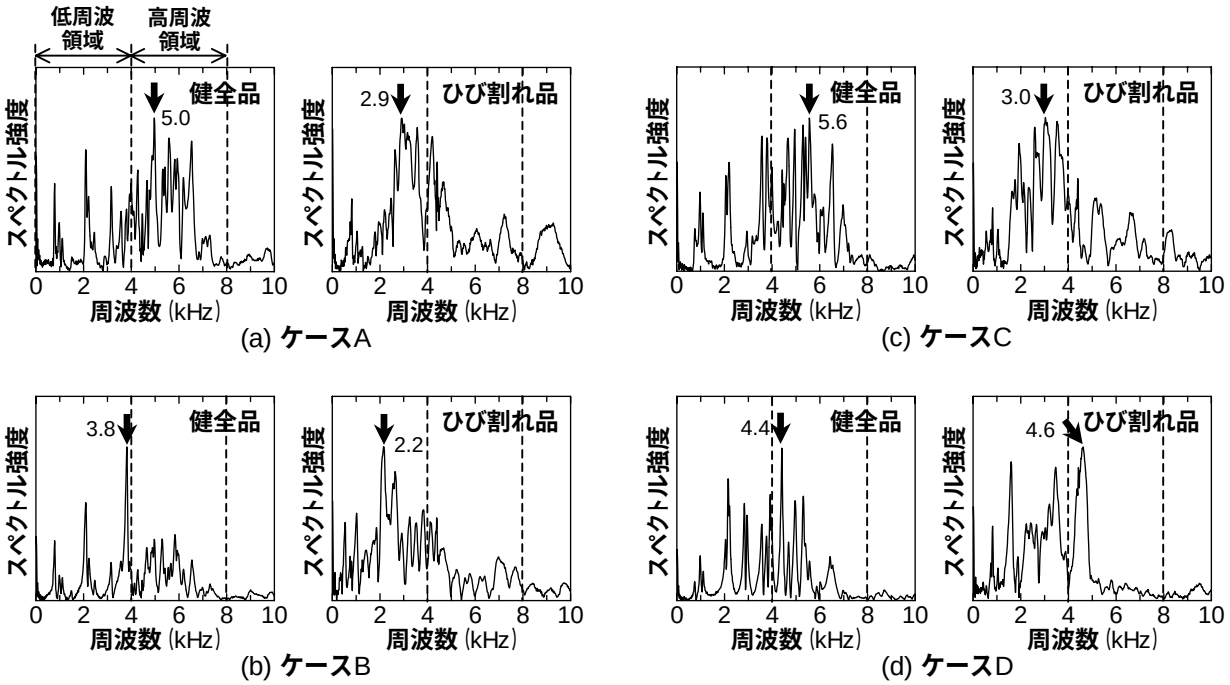
3.　実験結果および考察

3．1　弾性波入力・受振位置の影響

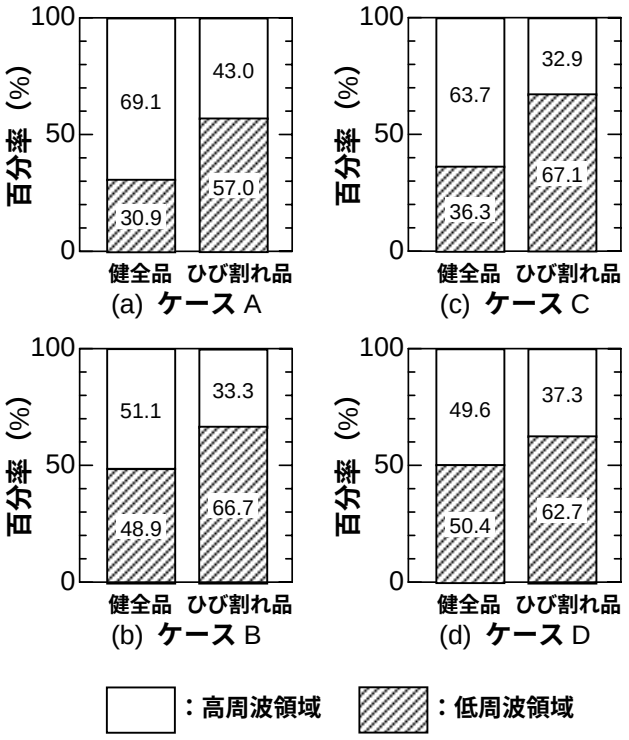
図－4 に，健全品およびひび割れ品について，ケース A～D の入力・受振位置で得られた周波数分布をそれぞれ示す。図中には，それぞれの最大ピークの周波数位置も加えて示した。なお，各実験ケースについて３回の計測を行ったが，周波数分布における再現性は良好であることが確認されたため，ここではその代表的な結果のみを示した。**図－4** によれば，供試体が同じ（健全品あるいはひび割れ品）であっても，入力・受振点のケースによって周波数の分布形状に違いが確認された。これは，入力位置を変えたことにより異なる種類の振動モードが励起された[5]ことや，受振位置によって，把握される振動の特性が異なることが理由と考えられる。したがって，ひび割れ評価に必要なパラメータを決定する上で，入力および受振の位置は重要な影響要因であるということができる。

また，この図によれば，入力位置を管中央部とした場合（**図－4(c)，(d)**）と比較して，管端部とした場合（**図－4(a)，(b)**）では，健全品およびひび割れ品のいずれにおいても最大ピーク周波数が低周波側に位置していることが分かる。

一方，受振位置に着目すると，管端部において受振した場合（**図－4(a)，(b)，(c)**）では，ひび割れ品では健全品に比べ低周波数側にピークシフトしているのが確認される。これは，ひび割れの存在により管全体の剛性が低下したことによるものと考えられ，たとえば，コンクリート橋脚の衝撃振動試験[6]において用いられる原理とほぼ等しい。しかしながら，**図－4(d)**では，健全品とひび割れ品との間で顕著なピーク



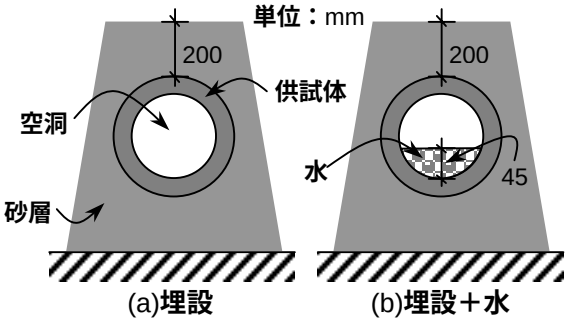
図－4　各入力・受振位置における周波数分布



図－5　各周波数領域における成分比

シフトは認められず，ピーク値がほぼ同じ値となっていることがわかる。この結果より，管中央部で受振する場合は, ひび割れが存在しても, ピークシフトによってその特徴をとらえることは困難である．さらに，**図－4**から，入力位置と受振位置とを離したケースAおよびC（**図－4(a)および(c)**）でのピークシフト量はそれぞれ 2.1，2.6kHz であるのに対して，入力と受振とを同位置で行ったケース B および D（**図－4(b)および(d)**）でのピークシフト量はそれぞれ 1.6，－0.2kHz であり，入力点と受振点との距離をある程度確保した方が，ひび割れの存在に起因する最大ピーク周波数のシフト量は大きくなることが分かる。

図－5 に, **図－4** で示した周波数分布について，低・高周波領域の各成分比を求めた結果について示す。これによれば, 全てのケースにおいて，ひび割れの存在によって低周波領域の成分比が増加していることがわかる。ピークシフトに着目した前述の検討結果においては，ケースDでは，ひび割れの有無を判別できなかったが，周波数領域の成分比をパラメータとした場合は，その違いを確認することが可能であった。ひび割れ品における健全品に対する低周波領域の成分比の増加量は，ケースAおよびCではそれぞれ約 26 および 31%であるのに対し,



図－6　供試体の埋設状況

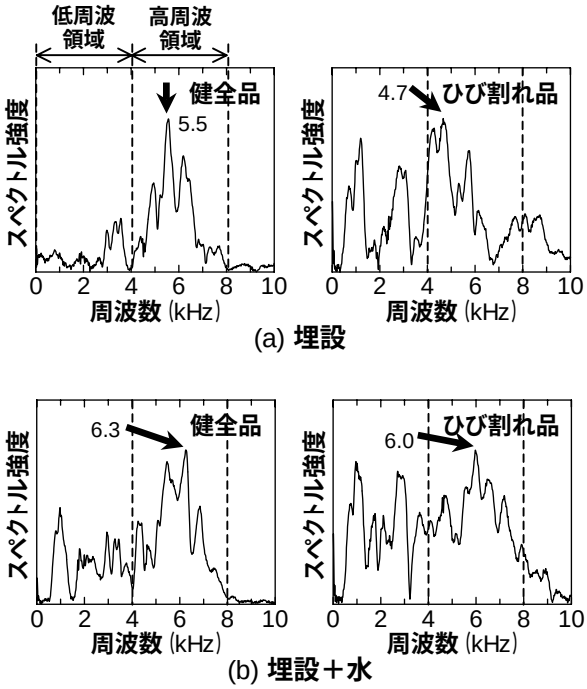
写真－2　供試体の埋設状況

ケース B および D では，それぞれ約 18 および 12%であった。これらは，ピークシフト量をパラメータとした場合の結果と同様の傾向である．また，ケースDでは成分比の変化量が最も小さく，ひび割れの有無を判別はできるものの感度は最も低いことが明らかとなった。

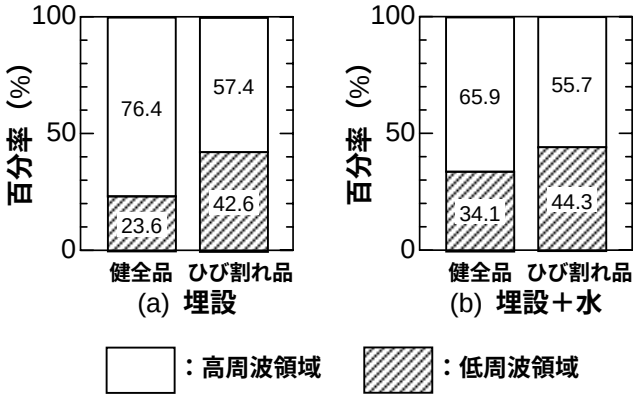
以上の結果から，管供試体におけるひび割れの存在を評価するには，受振を管端部とし，かつ入力・受振の位置関係を幾分か離した条件で計測を行うのが望ましいと考えられる。また, 本実験の範囲内では, 最大ピークの周波数よりも低周波領域の成分比に着目する方が，入力・受振の位置関係にとらわれず，ひび割れ評価に有効であることが分かった。

3．2　埋設等の境界条件の影響

実際の下水管路の置かれる環境を考慮し，供試体を砂層に埋設した条件，および埋設状態の管内に水をはった条件のもとで実験を行った。



図－7　埋設および水の条件が周波数分布に与える影響



図－8　埋設および水の条件が成分比に与える影響

図－6(a)および写真－2 に埋設状況を，**図－6(b)**に埋設および水の条件を示す。ここで，埋設における管上部の土被り厚は 200mm, 水を張った条件での水嵩は 45mm とした。また，この実験については, 弾性波の入力･受振位置を **3．1** の実験で良好な結果を示したケース A についてのみ行い，**3．1** と同様の検討を行った。

図－7(a)に埋設条件で得られた周波数分布を，**図－7(b)**に埋設・水はり条件で得られた周波数分布を示す。なお，図中にはそれぞれの最

大ピークの周波数位置を加えて示す。

図－7(a)および(b)のいずれの条件においても，ひび割れの存在によってピークが低周波数側にシフトすることが確認された。これは，**3．1** の結果と一致するものであった。**図－8** に，**図－7** で得られた周波数分布について低・高周波領域の各成分比を求めた結果を示す。これによれば，いずれの条件下でも，ひび割れの存在により低周波数領域の成分比は明確に増加しており，**3．1** と同様の傾向であった。

これらの結果より，評価パラメータは埋設環境，あるいは埋設環境下での水の存在の影響を受けて健全品とひび割れ品との間の差が小さくなる傾向はあるものの，本実験の範囲では，ひび割れの有無の評価が困難になるほどの影響はなく，実際の下水管路環境下への適用も可能であると考えられる。

4．　まとめと今後の展望

以下に，本研究で得られた結果を示す。

(1) 管供試体におけるひび割れの有無を，受振波の周波数分布における最大ピーク周波数のシフト量, あるいは低周波領域の成分比の増加量を評価パラメータとすることにより判断できることを明らかにした。

(2) 管供試体におけるひび割れの有無を評価するには，受振を管端部において行い，かつ入力点と受振点との間の距離をある程度確保した条件で計測を行うのが望ましいことが分かった。

(3) 本実験の範囲では，最大ピーク周波数のシフト量よりも低周波領域の成分比の方が, 入力・受振点の位置関係にとらわれず，ひび割れ評価に有効であった。

(4) 管供試体の砂層への埋設や管内における水の影響は, ひび割れの有無の評価の観点からは殆ど問題にならない程度のものであることが明らかとなった。

本研究では，低・高周波領域の区分境界については，とりあえず 4kHz に設定して各成分比を求めた。しかしながら，入力・受振の位置関係や埋設環境下といった条件によって周波数分布は異なり，あるいはセンサの特性等によっても結果が変化することから，各条件に適した境界値を設定することがひび割れなどの劣化を評価するのに望ましいと考えられる。

今後，取得波形の最大振幅値や減衰時間と言った他の評価パラメータについても検討を加え, 管路の劣化を想定した幾つかのパターンについて実験を行うことにより，劣化の進行度，劣化のパターンを判定できる手法へと発展させる予定である。

謝辞　実験の実施およびデータの整理等に際して協力頂いた岐阜大学大学院生の浅野雅則君, 内田慎哉君に深く謝意を表する

参考文献

1) 網谷力：「下水道管路施設の改築・修繕」－そのコンサルティング業務，管路リニューアル最新技術，pp.60-80，日本プロジェクトサーチ，2001．11

2) 井上弥九朗：管路を造る, 月刊下水道, Vol.24, No.5，pp.19-22，環境新聞社，2001．3

3) 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

4) 冨澤健二：下水管路を維持管理する，月刊下水道，Vol.24，No.5，pp.26-28，環境新聞社，2001．3

5) たとえば，星鐵太郎 ： 機械加工びびり現象－解析と対策，工業調査会，1979

6) たとえば，関雅樹：固有振動数に着目した東海道新幹線構造物の維持管理システムに関する研究，岐阜大学学位論文，2001.10