

## 論文 鉄筋コンクリート管に生じるひび割れの方向性と弾性波伝播特性の関係

浅野 雅則<sup>\*1</sup>・鎌田 敏郎<sup>\*2</sup>・田中 洋輔<sup>\*3</sup>・皆木 卓士<sup>\*4</sup>

要旨：本研究では、鉄筋コンクリート管に存在するひび割れの方向性（種類）と弾性波のパラメータとの関係について検討した。検討においては、パラメータとして周波数分布の面積比と波形のエネルギー比を用いた。その結果、周波数面積比は軸方向ひび割れを評価するのに適したものであった。一方周方向ひび割れは周波数面積比の変化は顕著ではなく、波形エネルギー比による評価が有効であった。このように、ひび割れ方向性の違いにより評価に適したパラメータは異なることが明らかとなった。

キーワード：非破壊検査，衝撃弾性波法，ひび割れ評価，鉄筋コンクリート管，周波数分布

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート管は、下水道管路として多く用いられており<sup>1)</sup>、下水道施設として重要な役割を担っている。しかしながら、中には敷設された年度による老朽化あるいは荷重・硫化水素などに起因する変状が認められることも報告されている<sup>2)</sup>。これらは管路上部の道路陥没にもつながるものであり、このような事故を未然に防ぐためにも適切かつ合理的な維持管理が望まれる。

著者らはこれに関連して、衝撃弾性波法を用いた検査方法に関する研究を行っており<sup>3-5)</sup>、その有効性を明らかにしている。

一方で一般の構造物もそうであるように、検査法結果から、現状の把握のみならず今後の対策について言及できることは社会基盤の合理的更新を考えた上で極めて重要である。例えば管に生じるひび割れについても、軸方向に生じる場合と周方向に生じる場合が存在するが、両者が管の自立性（剛性）にどのように影響するかは必ずしも明らかにされているわけでない。したがって例えば目視調査やTVカメラ調査にてひび割れの存在が把握されたとしても、それらの管の剛性に与える影響程度を把握することは

困難であるものと考えられる。

このような場合、間接的な手法により推定せざるを得ず、著者らがこれまで行ってきた衝撃弾性波法が適用可能であると考えられる。

そこで本研究では、衝撃弾性波法により、鉄筋コンクリート管に生じる軸方向および周方向ひび割れの定量的評価を目的として、以下に示す検討を行った。まず載荷試験により管に軸方向および周方向にひび割れを段階的に導入した。その後、各段階にて衝撃振動試験<sup>6)</sup>を実施し、それぞれのひび割れが管の剛性に与える影響を把握した。また同時に衝撃弾性波試験を実施し、周波数特性からひび割れ方向性（種類）の違いの影響を明らかにした。また周方向ひび割れについては波形エネルギー比を用いた検討も行い、その有効性を検討した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 載荷試験方法

##### (1) 外圧試験

管の軸方向にひび割れを導入するため、写真-1に示す方法で試験体に載荷した。載荷試験は、JIS A5372に準拠した方法で行った。写真に示したように、管頂部および底部に厚さ20mm

\*1 積水化学工業(株) 環境・ライフラインカンパニー 環境土木システム事業部 工博 (正会員)

\*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助教授 工博 (正会員)

\*3 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*4 積水化学工業(株) 環境・ライフラインカンパニー 環境土木システム事業部 工修 (正会員)

のゴム板を設置し，さらに頂部には 150 × 150mm の角材を当て，その上に荷重を均等に分配するための H 型鋼を設置して線荷重を作用させた。

試験には，長さ 1900mm，内径 250mm および厚さ 28mm の B 型 1 種遠心力鉄筋コンクリート管で，ひび割れ荷重 16.7kN/m，破壊荷重 25.6kN/m の規格のものを用いた。

ひび割れの進行レベルを把握する目的で，本研究では，荷重 - 管頂部鉛直方向変位を計測した。変位計（感度 500  $\mu$ /mm）の設置状況を写真 - 2 に示す。なお，外圧試験では合計 8 回繰り返し載荷を行い，徐々に軸方向ひび割れを進展させた。

## (2) 曲げ試験

管中央部に周方向ひび割れを導入するため，写真 - 3 に示すような曲げ試験を行った。曲げ試験では，ひび割れの進行レベルを把握するため，パイ型変位計（感度 1000  $\mu$ /mm）によりひび割れ開口変位を計測した。パイ型変位計設置状況を写真 - 4 に示す。

曲げ試験に用いた供試体は，外圧試験に用いたものと同様の規格のものを用いた。供試体中央部に周方向ひび割れを導入するため，切欠きを設けた。曲げ試験では合計 6 回繰り返し載荷を行い，徐々に周方向ひび割れを進展させた。

## 2.2 衝撃振動試験

打撃にはプラスチックハンマを用い，さらにゴム板を介して，より低い周波数領域の弾性波を入力することを試みた。また受振センサには，後述の衝撃弾性波法で用いたものより低い周波数領域をカバーする加速度計(0.01 ~ 3kHz)を用いた。計測概要を図 - 1 に示す。計測におけるサンプリングタイムは 50  $\mu$ s とした。ここでは，周波数分布に存在するピーク周波数を抽出した。このようにして得られたピーク周波数を，管の剛性をあらわす指標とした。

この試験は，載荷前および各載荷ステップ後に行った。

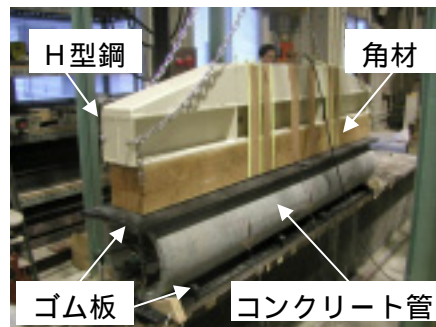


写真 - 1 外圧試験概要



写真 - 2 変位計設置状況

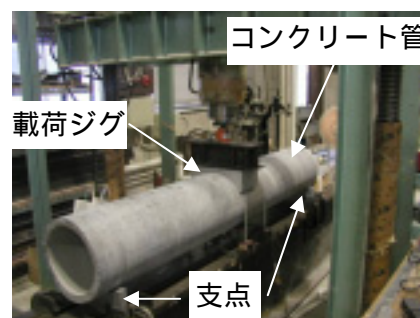


写真 - 3 曲げ試験概要



写真 - 4 パイ型変位計設置状況

## 2.3 衝撃弾性波試験

弾性波の入力にはインパルスハンマを，受振には加速度センサ(0.02 ~ 45kHz)を用いた。打撃方法を一定とするため，インパルスハンマと打撃用ジグを一体化させた装置を用いた。なお，

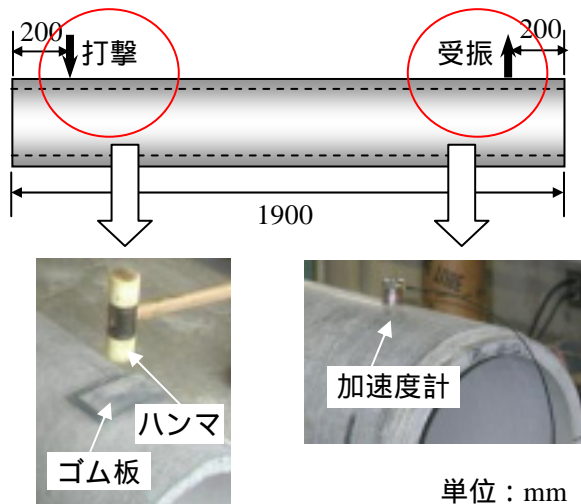


図 - 1 衝撃振動試験概要

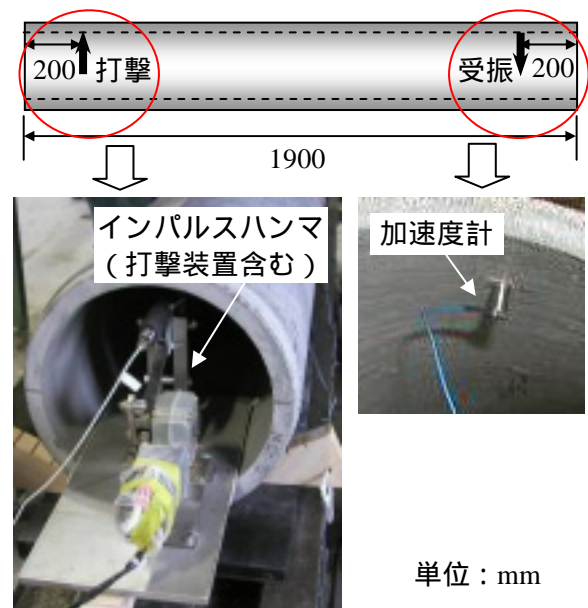


図 - 2 衝撃弾性波法概要

衝撃弾性波法の計測では、特に埋設された状態での適用を想定し、打撃・受振とも管の内面から行なうこととした。打撃・受振位置は、図 - 2 に示すように、それぞれ管端部より 200mm 内側の位置とした。計測におけるサンプリングタイムは  $10\mu s$  とした。本研究では、受振波形に対して FFT (高速フーリエ変換) を行い、周波数分布を求めた。

本研究では、上記のようにして得られた周波数分布について、変化の傾向を数値的に表現するため、 $0\sim 5\text{kHz}$  までの周波数領域および  $0\sim 10\text{kHz}$  までの周波数領域について周波数分布曲線下の面積を求め、相互の比をとって周波数面積比とした。外圧試験・曲げ試験ともに、载荷ステップと周波数面積比との関係性を求めた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 荷重 - 変位曲線と衝撃振動試験結果

外圧試験により得られた荷重 - 変位曲線を図 - 3 に、曲げ試験により得られた荷重開口変位曲線を図 - 4 にそれぞれ示す。図中の数字はそれぞれ载荷ステップを示している。

外圧試験・曲げ試験ともに、ひび割れの発生により一旦荷重が低下した後、最大荷重に到達するまで徐々に荷重が増加するという形状を示した。外圧試験では管の軸方向にひび割れが発

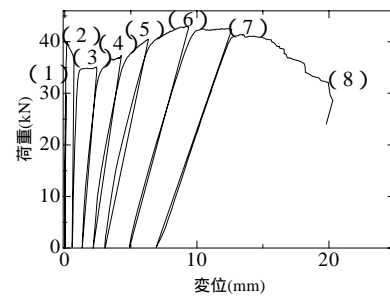


図 - 3 外圧試験の荷重 - 変位曲線

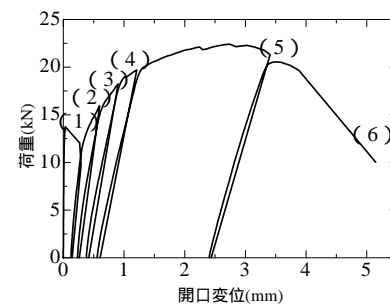


図 - 4 曲げ試験の荷重 - 変位曲線

生し (写真 - 5), 破壊に至った。曲げ試験では切りかき位置に管周方向にひび割れが発生し (写真 - 6), そのひび割れの開口変位が増大することにより破壊に至った。

各载荷ステップにおける衝撃振動試験の結果を、外圧試験供試体については図 - 5 に、曲げ試験供試体については図 - 6 にそれぞれ示す。

外圧試験における共振周波数は、軸方向ひび



写真 - 5 軸方向ひび割れ (外圧試験)

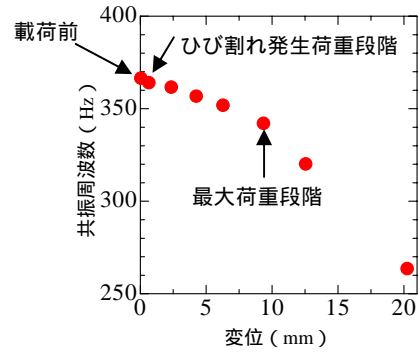


図 - 5 共振周波数の変化 (外圧試験)



写真 - 6 周方向ひび割れ (曲げ試験)

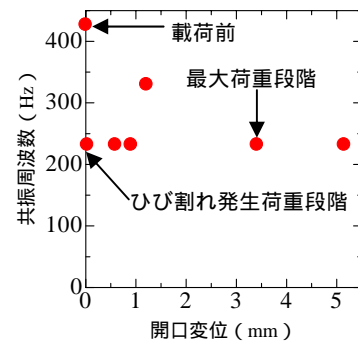


図 - 6 共振周波数の変化 (曲げ試験)

割れの発生および進展に従い、徐々に小さくなるのがわかる。鉄筋コンクリート部材を対象とした衝撃振動試験では、部材剛性の低下により共振周波数が低下することが知られており<sup>6)</sup>、本研究でもその傾向が明らかとなった。

一方、曲げ試験における衝撃振動試験結果は、ひび割れが発生すると、ひび割れ発生後に共振周波数は顕著に低下することが認められるものの、ひび割れ幅（開口変位）に関係なくほとんどのケースにおいて同じ値を示している。

ところで、外圧試験と曲げ試験において、载荷前における共振周波数の値は異なっている。これは、曲げ試験では、外圧試験と異なり供試体の底面がフリー（無拘束）の状態では衝撃振動試験を実施したためと考えられる。両者の共振周波数測定における周波数分布の違いを図 - 7 に示す。

この図によれば、対象とする管の境界条件が異なることにより、共振周波数の値も異なるものであることがわかる。

共振周波数の絶対値を用いた評価を行う場合には、この点を十分に注意する必要がある。

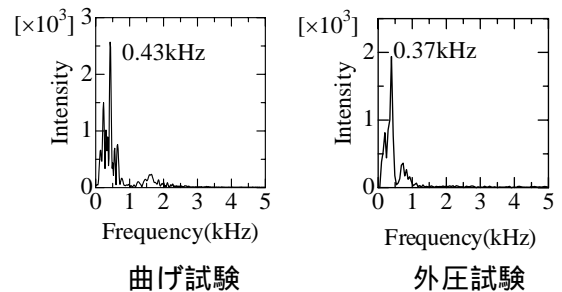


図 - 7 载荷前供試体における衝撃振動試験での境界条件の影響

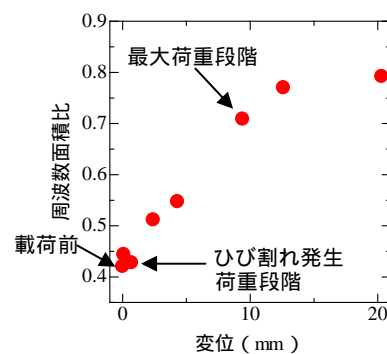


図 - 8 衝撃弾性波試験結果 (外圧試験)

### 3.2 衝撃弾性波試験結果

#### (1) 周波数面積比

図 - 8 に外圧試験供試体について、図 - 9 に曲げ試験供試体について周波数面積比の変化をそれぞれ示す。

図 - 8 から、外圧試験供試体については、ひび割れ発生荷重段階以降、周波数面積比は増加し、最大荷重段階を超えると頭打ちすることがわかる。すなわち、周波数面積比によれば、ひび割れ発生から最大荷重に至るまでの領域において、ひび割れが進展するほど低周波数領域の成分割合が増加する傾向を明確に示すことが可能である。このように、衝撃弾性波試験結果は、衝撃振動試験に対して、最大荷重に至るまでのひび割れ進展度合いをより詳細に評価できる可能性があるものと考えられる。

曲げ試験供試体については、2点支持された状態で衝撃弾性波試験を実施した結果である。図 - 9 より、管に周方向のひび割れが発生・進展した場合には、ひび割れが発生していない場合と比較しても、軸方向ひび割れの場合と比べて周波数面積比の差は極めて小さく、周方向ひび割れの存在を周波数面積比から判断するのは極めて困難であると考えられる。これは、先に示したように周方向ひび割れは部材の剛性の低下に寄与しないため、衝撃弾性波試験においてもその影響が現れなかったものと考えられる。

そこで、周方向ひび割れの存在を評価するために、波形の特性を用いた検討を行った。ここでは試みとして、波形エネルギーを用いた。図 - 10 に波形エネルギーの算出方法を示す。本研究では、受振波形を絶対値変換した後、波形と時間軸で囲まれる領域の面積を「波形エネルギー」として定義した。なおここでは、载荷前（ひび割れなしのケース）に得られた波形エネルギーに対する任意の载荷段階で得られた波形エネルギーの比を求め、この値を「波形エネルギー比」として定義した。

図 - 11 に周方向ひび割れ供試体における波形エネルギーの変化を示す。この図によれば、開

口変位が増加するに従い徐々に波形エネルギー比は減少していく傾向がわかる。これは、管の周方向にひび割れが存在するため、伝播する弾性

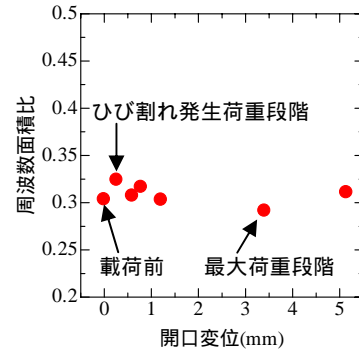
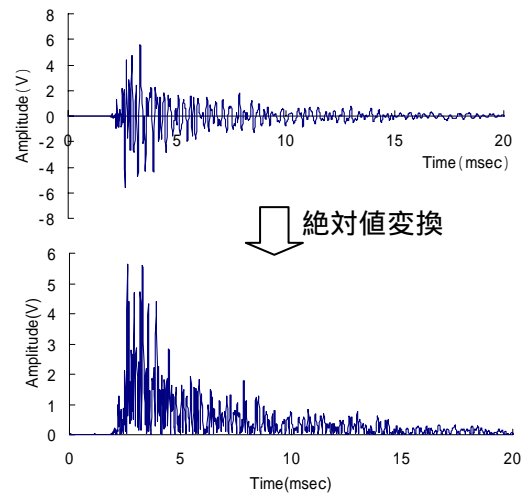


図 - 9 衝撃弾性波試験結果（曲げ試験）



$$E_{wave} = \sum_{i=0}^n \Delta t \cdot \left\{ \frac{|A_i| + |A_{i+1}|}{2} \right\}$$

$E_{wave}$  : 波形エネルギー     $t$  : 時間間隔（一定）  
 $A(t)$  : 波形の振幅     $A_i, A_{i+1}$  : 任意時間の振幅

図 - 10 波形エネルギーの算出方法

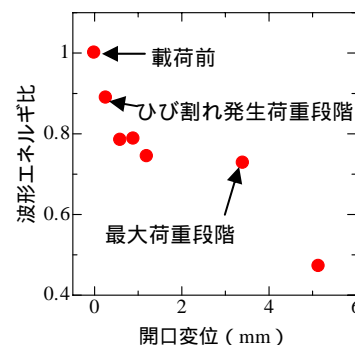


図 - 11 波形エネルギー比（曲げ試験）

波がひび割れ部において減衰の影響を受け，結果として伝播する弾性波のエネルギーが減少したものと考えられる。また，ひび割れ発生荷重段階のようなひび割れ幅が極めて小さい（約0.27mm程度）周方向ひび割れについても，載荷前の波形エネルギーに対して10%程度の差が現れる結果となっている。

周方向ひび割れは，部材剛性に影響を与えないものであり，衝撃弾性波試験における周波数分布では評価が困難であったが，波形エネルギーを導入することにより，周方向ひび割れの存在のみならず，その進展の程度までも評価できることが明らかとなった。

このように，鉄筋コンクリート管に生じるひび割れを検出する場合には，1つのパラメータのみではなく，複数のパラメータを考慮した検討により，管に生じるひび割れの方向性とその進展度までも評価できる可能性が明らかとなった。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 衝撃弾性波試験にて得られる周波数分布の面積比を用いた結果，部材剛性を低下させる軸方向ひび割れについてはひび割れの進展に従い徐々に周波数面積比が増大し，周波数面積比を用いたひび割れの評価は可能である。
- 2) 一方，部材剛性にほとんど影響しない周方向ひび割れについては，破壊に至った場合でも周波数面積比に有意な違いは認められなかった。
- 3) 波形エネルギーを用いて周方向ひび割れの評価を試みた結果，ひび割れの進展とともに波形エネルギー比は減少する傾向を示したため，波形エネルギーを用いれば管周方向に生じるひび割れを評価できることが明らかとなった。
- 4) 管の軸方向に生じるひび割れは周波数面積比により，管の周方向に生じるひび割れに

については波形エネルギーにより評価できることが明らかとなり，複数の弾性波パラメータを用いれば管に生じるひび割れをより詳細に把握できる可能性が明らかとなった。

今後は，実際に鉄筋コンクリート管に生じるひび割れ状況，例えば軸方向ひび割れと周方向ひび割れの複合劣化や，硫化水素などにより生じる腐食程度の影響などを定量的に評価するための検討を行う予定である。

謝辞：本研究における実験の実施およびデータの整理に際して，岐阜大学大学院下村雄介氏，積水化学工業株式会社鬼塚哲雄氏および飯田光氏に多大なご助力をいただいた。記してここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料，No.64，平成13年度下水関係調査研究年次報告書集，pp.159-166，2002
- 2) (財)下水道新技術推進機構：管きよ更正工法の品質管理技術資料，pp.12-13，2005.3
- 3) 舟橋孝仁，鎌田敏郎，皆木卓士，浅野雅則：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，コンクリート工学年次論文集，No.25，Vol.1，pp.1625-1630，2003
- 4) 舟橋孝仁，鎌田敏郎，浅野雅則，皆木卓士：衝撃弾性波法によるコンクリート下水管路の劣化診断における埋設条件の影響，コンクリート工学年次論文集，No.26，Vol.1，pp.1893-1898，2004
- 5) 皆木卓士，鎌田敏郎，浅野雅則，舟橋孝仁：弾性波を用いた下水道管路の劣化診断手法に関する研究，下水道協会誌，No.505，Vol.41，pp.119-129，2004
- 6) 西村昭彦：既設橋梁橋脚の健全度判定法に関する研究，鉄道総研報告，Vol.3，No.8，1989