

論文 弾性波挙動に基づくコンクリート管のひびわれ評価

鬼塚 哲雄^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・浅野 雅則^{*3}・下村 雄介^{*4}

要旨：本研究では、コンクリート管の載荷試験時に生じるひび割れを対象として、衝撃弾性波法に基づくひび割れ進展度の評価方法について検討した。実験では、得られた周波数分布とひび割れ進行レベルとの関係を詳細に検討した。その結果、周波数分布における低周波成分の割合を示す周波数面積比は、コンクリート管のひび割れ進展度と良い相関があり、より軽微なひび割れに対しても高い感度を有す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, コンクリート管, 周波数分布

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、使用状態ではひび割れの発生を許容している。しかしながら、ひび割れの存在は、構造物の剛性を低下させるのみならず、コンクリート内部への水や化学物質の侵入口となる可能性もあり、鉄筋腐食を誘発する原因ともなりうる。このため、コンクリートの耐久性を考える上で、ひび割れを適切に評価することは極めて重要である。

このことは、地中に埋設されたコンクリート製下水管の場合でも同様である。コンクリート管にひび割れが生じた場合、外部からの地下水の浸入、さらには管路周囲に存在する土砂の流入による汚水・雨水の流下能力の低下等、管路の使用状態に多大な影響を及ぼす場合もある。さらには、ひび割れのレベルによっては、管頂部の崩壊に起因する道路陥没に至る場合もあり、ひび割れの有無のみならず進展の程度についての評価が重要となる。

これに関連して、著者らは既にコンクリート管の劣化程度を評価するための衝撃弾性波法について検討を行っている^{1),2),3)}。これらの一連の検討により、コンクリート管に発生するひび割れ評価における衝撃弾性波法の適用の可能性が明らかにされている。しかしながら、上記の検

討はひび割れの有無の把握や規模の大小の単純比較に止まっており、ひび割れの進展程度の定量的評価に対する本手法の有効性については未だ十分には検討されていないのが現状である。

そこで本研究では、図-1に示すプロセスに基づいて、円管の直径方向に圧縮荷重を加えることによりコンクリート管のひび割れを段階的に進行させた。そして、各段階において衝撃弾性波法を適用し、得られた周波数分布とひび割

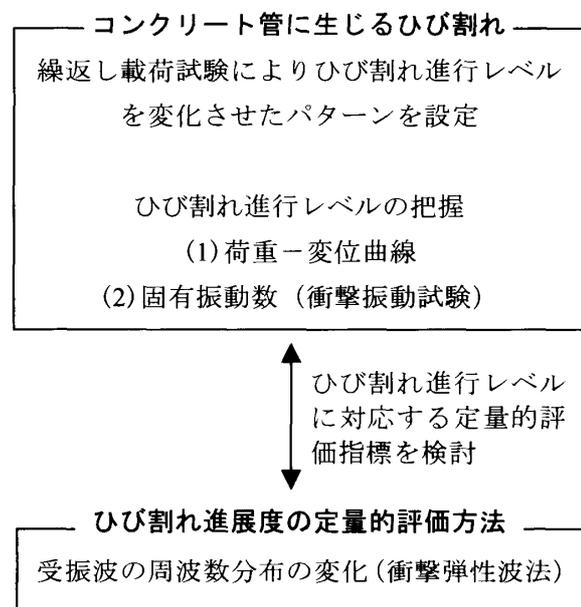


図-1 本研究のプロセス

*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 工学部社会基盤工学科助教授 工博 (正会員)

*3 積水化学工業 (株) 環境土木システム事業部 工博 (正会員)

*4 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻

れの進展程度との関係を明らかにすることを目的とした。

なお本研究では、ひび割れの進行レベルは、図-1に示すとおり、荷重-変位曲線と衝撃振動試験⁴⁾により得られる固有振動数により把握することとした。この衝撃振動試験は、橋脚等の構造物の剛性（損傷レベルなど）の程度を非破壊的に求める方法として用いられるものである。

しかしながら、衝撃振動試験により得られる固有振動数は、管周辺の土質などの埋設条件の影響を受けやすい。このため、たとえば、コンクリート管全体が埋設された条件下では、ひび割れ評価に固有振動数を適用するのは困難な場合が考えられる。したがって、本研究では、埋設しない条件下で実施した衝撃振動試験の結果（固有振動数）を、あくまでもひび割れ進行レベルの目安を示す指標としてとらえることによって、今後埋設条件下でも適用可能³⁾な衝撃弾性波法をベースとした検討を行うこととした。

2. 実験概要

本実験では、合計8回の繰り返し荷重を行うことで、試験体におけるひび割れを徐々に進展させるとともに、併せて荷重と変位の計測も行った。また、各荷重ステップの除荷後に衝撃振動試験と衝撃弾性波法による計測をそれぞれ行った。なお比較のため、これらの計測は荷重前のコンクリート管についても行うこととした。各試験の詳細は次のとおりである。

2.1 繰り返し荷重試験

写真-1に示す方法で試験体に荷重し、ひび割れを導入した。荷重試験は、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33.4kN、破壊荷重51.2kNの規格のものを用いた。

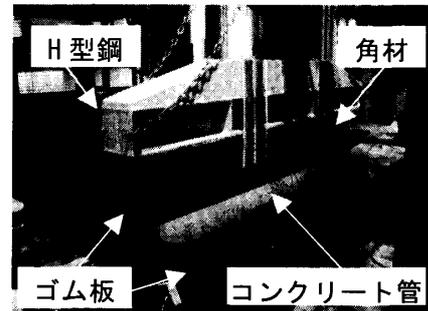


写真-1 荷重試験概要

2.2 荷重-変位計測

荷重試験時には、荷重の計測を行うとともに、管の頂部と底部の相対変位を高感度変位計（感度：500 μ /mm）により計測した。計測状況を写真-2に示す。

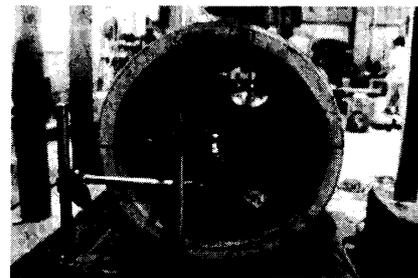
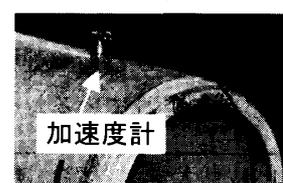
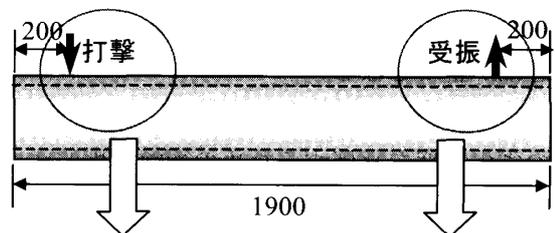


写真-2 変位計設置状況

なお、本計測で得られる相対変位（以下、変位とする）を制御することによってひび割れ進行レベルを変化させた。

2.3 衝撃振動試験



単位：mm

図-2 衝撃振動試験概要

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-2に示す。計測におけるサンプリングタイムは $50\mu\text{s}$ 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。

2.4 衝撃弾性波法

弾性波の入力にはインパルスハンマを、受振には加速度計(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、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・受信とも管の内面から行なうこととした。打撃・受信位置は、図-3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 $10\mu\text{s}$ 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。

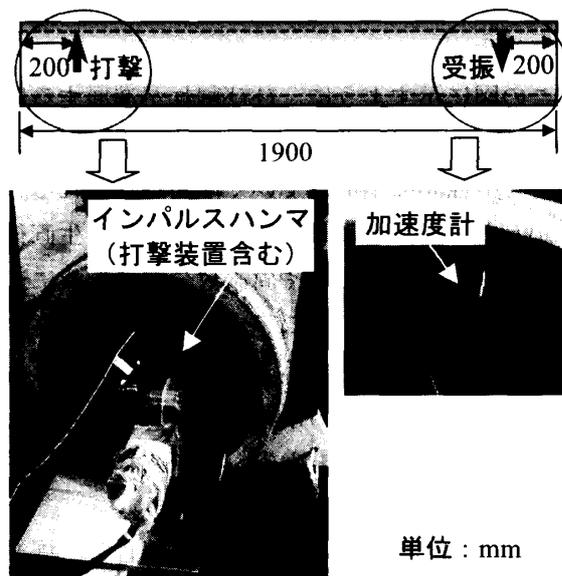


図-3 衝撃弾性波法概要

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ進行レベルの把握

ひび割れの進展に伴い、変位や管全体の剛性が変化することから、本研究では、荷重-変位曲線と固有振動数を用いて、ひび割れの進行レベルを把握した。

(1) 荷重-変位曲線

図-4に、繰り返し载荷により得られた荷重-変位曲線を示す。なお、図中の(1)~(8)の番号は载荷ステップを表している。

図からわかるように、ひび割れ発生後、荷重は一旦低下し、その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。ひび割れは、はじめは底面(頂部)側に発生し、荷重の増加とともに軸方向に進展した。そして、底面(頂部)にひび割れが発生した直後に側面にもひび割れが発生・進展し、最終的に頂部のコンクリートが圧縮破壊を起こした。

荷重-変位曲線は、この一連の軸方向ひび割れの進展に伴って前述した挙動を示しており、これによって、ひび割れの進行レベルが定性的に判断できる。

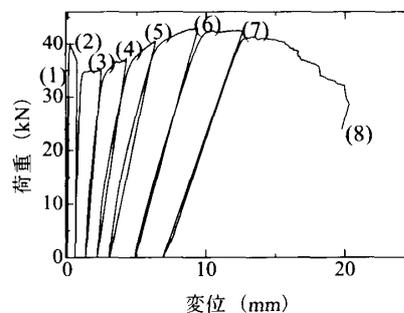


図-4 荷重-変位曲線

(2) 固有振動数

図-5に衝撃振動試験において得られた波形と周波数分布を、载荷前、ひび割れ発生直後(図-4の(2))、変位4.3mmの場合(図-4の(4))および変位12.6mmの場合(図-4の(7))について示す。

これにより、いずれの载荷ステップにおいても、周波数分布には1つの明確なピークが確認できる。本研究ではこのピーク周波数を、コンクリート管の剛性を示す固有振動数として用いることとする。

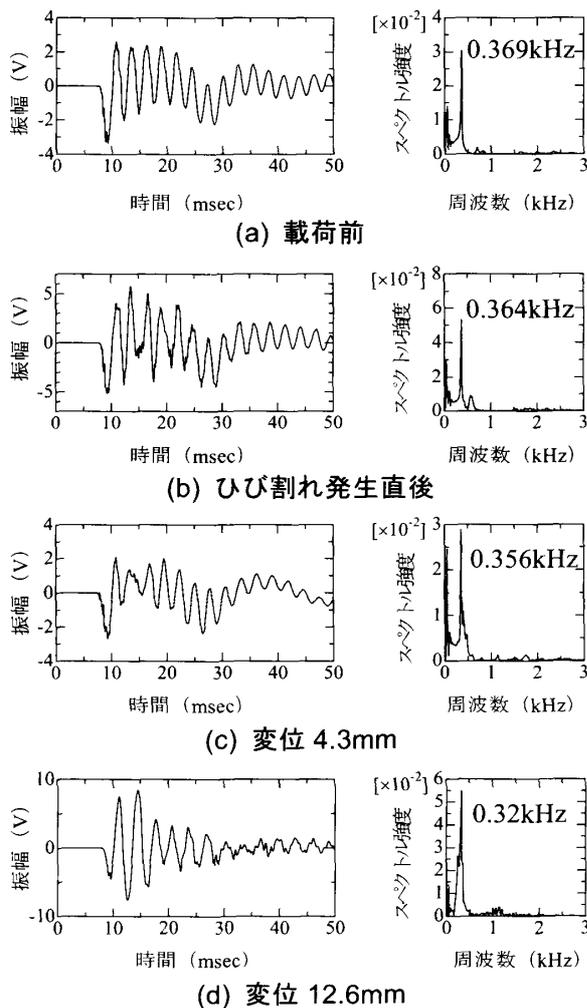


図-5 受振波形と周波数分布 (衝撃振動試験)

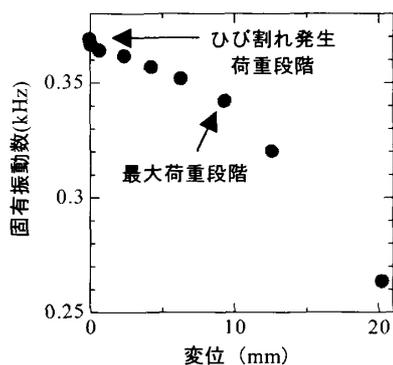


図-6 変位と固有振動数

図-5より、変位が大きくなる(ひび割れが進展する)とともに固有振動数は徐々に小さな値となっていることがわかる。この傾向をすべての荷重ステップについて把握するため、図-6に荷重試験における変位の増大にともなう固

有振動数の変化を示す。この結果は衝撃振動試験における一般的なデータ⁵⁾や、先に示した荷重-変位曲線において見られた再荷重曲線の傾きの変化と類似している。このことから、固有振動数は、荷重により生じたひび割れの発生および進展によって引き起こされたコンクリート管断面の剛性の低下により変化したものと考えられる。固有振動数は、最大荷重段階まで荷重したケースにおいて、ひび割れなしの場合と比較して10%程度の低下を示した。最大荷重以降は固有振動数の低下割合が大きくなり、終局状態(図-4の(8))では、低下率は約30%となった。

このことから、本実験においては、コンクリート管におけるひび割れの進展は、最大荷重段階までは緩やかであるが、その段階を越えると著しくなることがわかった。

3.2 衝撃弾性波法によるひび割れ進展度の定量的評価

荷重前、ひび割れ発生直後(図-4の(2))、変位4.3mmの場合(図-4の(4))および変位12.6mmの場合(図-4の(7))において衝撃弾性波法により得られた波形と周波数分布を図-7に示す。

この図に示すように、ひび割れが進展するにしたがって、周波数分布における低周波数領域の成分が徐々に増加していく傾向が見られる。しかしながら、特に荷重前とひび割れ発生直後とを比較すると、波形や周波数分布の形状に違いはみられるものの、このままではその程度の違いを定量的に判断することは困難である。その他の場合においても、荷重前との形状の違いは十分に確認できるものの、ひび割れ進展程度の定量的判断が難しい。

そこで周波数分布形状の特徴に着目し、周波数分布の特性を数値的に表現することを試みる。図-8に数値化の手法を示す。ここでは、図に示すように、5kHz以下の領域および10kHzの領域のそれぞれ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

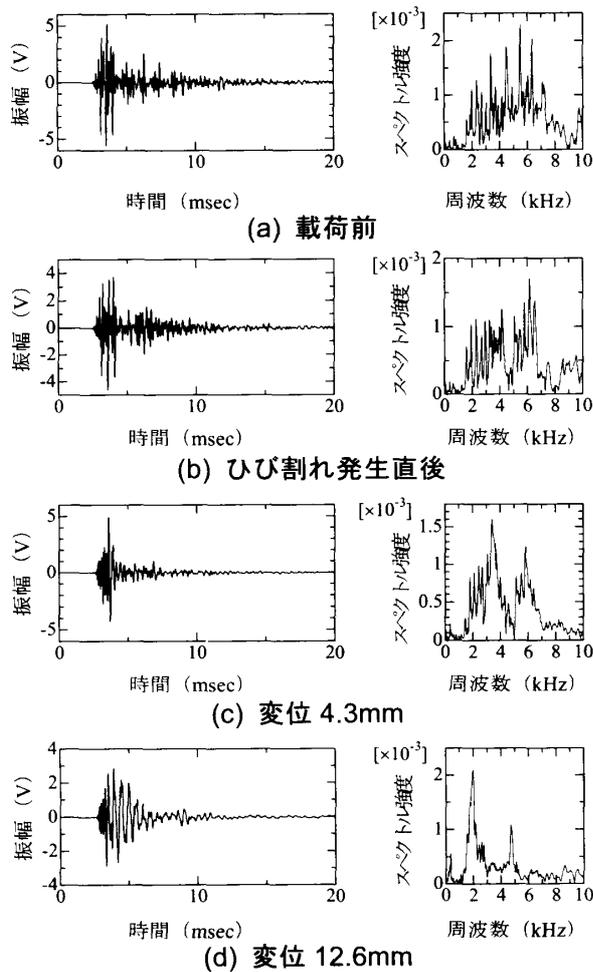
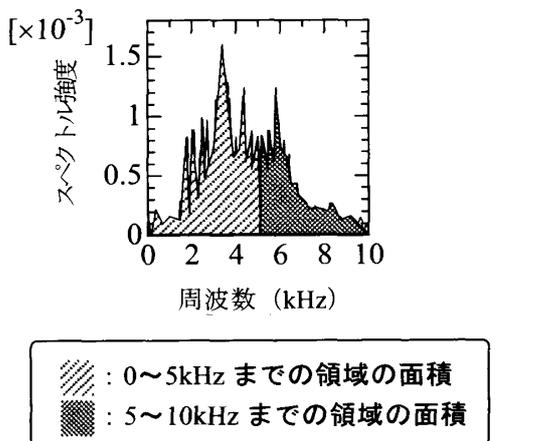


図-7 受振波形と周波数分布 (衝撃弾性波法)



$$\text{周波数面積比} = \frac{0 \sim 5\text{kHz までの領域の面積}}{0 \sim 10\text{kHz までの領域の面積}}$$

図-8 周波数分布の数値化手法

た。

図-9に周波数面積比と繰返し荷重における荷重-変位との関係を示す。この図から、ひび割れ発生荷重段階以降、この面積比は増加し、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。

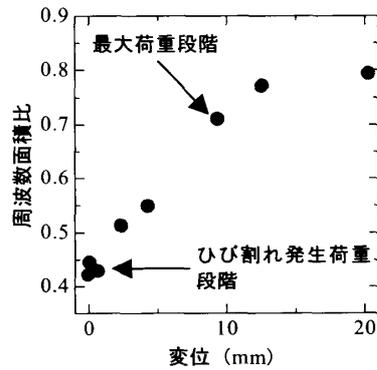


図-9 周波数面積比と変位の関係

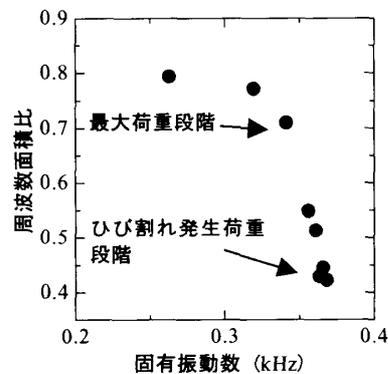


図-10 周波数面積比と固有振動数の関係

次に、周波数面積比と固有振動数との関係を図-10に示す。図より、ひび割れ発生後から最大荷重段階に至るまでの固有振動数の低下が緩やかとなる領域においても、衝撃弾性波法による周波数面積比の変化は大きくなっている。一方、最大荷重段階以降において剛性の低下が大きくなった状態では、周波数面積比の変動は小さくなった。

このように、周波数面積比は、剛性低下が小

さい、すなわち、ひび割れの進行レベルが低い段階において特に感度を有する特性があることが明らかとなった。

したがって、実務において、埋設されたコンクリート管の検査を行う場合は、衝撃弾性波法により得られる周波数面積比を用いることによって、より軽微なレベルのひび割れに対しても、その程度を評価できるものと考えられる。これによって、より早期の段階で、適確なひび割れ評価が可能となることから、合理的な維持管理の実現に役立つものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 本実験で求めた固有振動数は、コンクリート管の管頂部の変位が増加するにしたがい徐々に小さくなる傾向にあった。これは、コンクリート管の剛性の程度を示すものであることが確認できた。
- 2) ひび割れの進展に伴うコンクリート管の剛性低下は、最大荷重段階までは緩やかであり、その段階を越えると著しくなることがわかった。
- 3) ひび割れが進展するにしたがって、衝撃弾性波法により得られた周波数分布における低周波数領域の割合は、徐々に増加していく傾向にあることが示された。
- 4) ひび割れ進展度の評価指標として、衝撃弾性波法における周波数分布特性を数値化することにより求めた周波数面積比を定義した。周波数面積比は、コンクリート管におけるひび割れ発生から最大荷重段階に至るまでの間、管頂部変位の増加にしたがって単調に増大することが明らかとなった。
- 5) 周波数面積比は、ひび割れの進展による固有振動数の低下が緩やかな領域においても、ひび割れ進展度の評価指標として十分な感度を有することがわかった。
- 6) 一方で、周波数面積比は、ひび割れがかなり進行した状態では、ひび割れ程度の評価指標としては、あまり有効とは言えない。

本研究では内径 250mm の供試体のみを用いて検討したが、今後は管口径が異なる場合についても同様の検討を進める予定である。また、下水管の劣化としては軸方向ひび割れだけではなく、硫化水素ガスによるコンクリート管厚の減少や円周方向に生じるひび割れ等もその程度が判断できるよう考慮しなければならない。これらのケースに関しても今後検討を進める。これら一連の研究結果をもとに、衝撃弾性波法をコンクリート管に生じる劣化の総合的な評価手法として発展させる予定である。

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、岐阜大学学部生の田中洋輔氏および積水化学工業株式会社皆木卓士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る。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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.1893-1895, 2004
- 4) 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
- 5) 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, 岐阜大学博士論文, 2001