

論文 超音波共振法による劣化したPC管水路の非破壊試験

石黒 覚*1・小島靖司*2・岡島賢治*3・茨田 匠*4

要旨：PC管の内面から外面の欠陥を検査する方法として、超音波共振法と超音波スペクトル解析を組み合わせた方法を適用した。本方法の適用性を検証するため、模擬欠陥を設けたコンクリート版ならびに鉄筋コンクリート管を対象として非破壊試験を実施した。本試験結果から、測定波形のスペクトル解析結果から3～10kHzの周波数スペクトルをパラメータとした場合、コンクリート版や管の外面の欠陥を比較的精度よく探査できることがわかった。また、本方法を土中に埋設されたPC管水路の現地調査に適用し、その探査精度ならびに適用上の留意点などを検討した。

キーワード：PC管, 非破壊試験, 周波数スペクトル, 超音波共振法

1. はじめに

プレストレストコンクリート(PC)管は、1950年代から1980年代頃まで農業用の管水路に多く用いられてきた。これらPC管は土中に埋設されてから長年月が経過し、近年、経年劣化による機能低下や破損事故などにより安定した水管理に支障をきたす事態が発生している。このため供用中のPC管水路の劣化状況を把握し、破損などに対する予防対策を講じることが急務となっている。

PC管の構造は図-1のようであり、その破損は、管外面におけるカバーコートモルタルの化学的あるいは物理的浸食に伴うPC鋼線の腐食による破断が原因と考えられている¹⁾。このため、管水路の健全度を評価するためには管の外面の浸食や欠陥(損傷)の程度を適切に把握する必要がある。しかし、膨大な延長の管水路を掘削して管の外面を調べることは多大の時間と費用がかかるため、管の内面から外面の欠陥を迅速に探査するための有効な検査手法が求められている。

PC管の検査方法として、超音波法を用いて管内面から管厚を測定する方法が提案されており、カバーコート厚さを定量的に評価できることが報告されている²⁾。一方、著者らは、横波超音波共振法を適用し、模擬欠陥を有する鉄筋コンクリート管の内面から非破壊試験を実施した結果から、測定波形の最大振幅から外面の欠陥の有無を評価できることを報告した³⁾。また、横波超音波共振法は、コンクリートとモルタルの接着面における剥離や空洞などの欠陥を、測定波形の最大振幅から精度よく探査できることを報告した⁴⁾。

本研究では、超音波共振法による測定波形の最大振幅以外にその周波数スペクトルに着目し、これを評価パラメータとした場合について、コンクリート管外面の欠陥探査への適用性を検討した。

2. 模擬欠陥を設けた供試体の非破壊試験

2.1 超音波共振法による非破壊試験の概要

コンクリート外面の欠陥探査の概要を図-2に示す。浸食などにより部材厚さが減少した欠陥(損傷)部では部材の固有振動数が変化するため、共振振動波形も変化する。したがって、コンクリート表面に発振・受振用のセンサーを適当な間隔で配置して振動波形を計測・記録

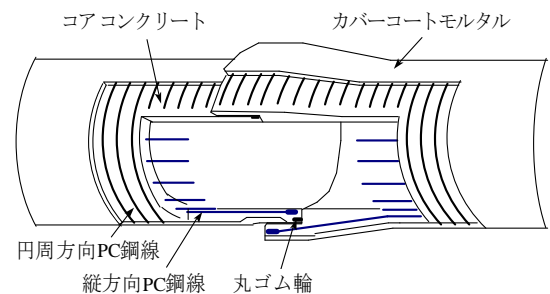


図-1 PC管の構造

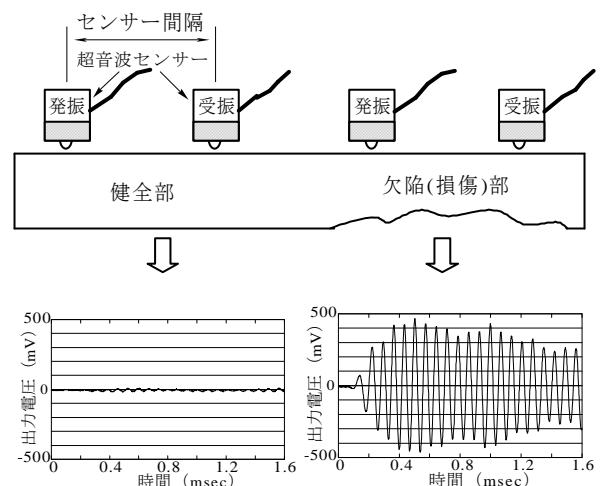


図-2 超音波共振法による欠陥検査の概要

*1 三重大学 生物資源学研究科教授 農博(正会員)

*2 鈴鹿市役所

*3 三重大学 生物資源学研究科講師 博士(農学)

*4 三協エンジニアリング(株)

し、その波形データを解析することにより、健全部と欠陥（損傷）部の測定波形の形状変化により部材厚さの変化を推定することが可能と考えられる。

既往の研究では、測定波形データから最大値および最小値の出力電圧を求め、（最大値－最小値）の値を最大振れ幅(mV)と定義し、この値をパラメータとして欠陥の有無を評価した^{3),4)}。本研究では、周波数スペクトルの変化に着目し、波形データをスペクトル解析してその値をパラメータとして部材の欠陥探査を行った。

なお、実際の浸食状況が部材断面に対して20～30%であったことから、本編では、**図-3**および**図-12**に示すような模擬欠陥とした。

また、超音波試験は、発振・受振用センサーとして、周波数5kHzの点接触型の横波センサー、測定器として波形を取り込めるものを使用した。今回使用したセンサーは、コンクリート表面において点接触で適用できるため、センサーとコンクリート間の接触媒質が不要となり、短時間で多点数の測定ができる利点がある。なお、点接触であるため、試験時には、バネを介してセンサーをコンクリート表面に一定の圧力で押しつけて測定した。

2.2 コンクリート版における欠陥探査

コンクリート版（600×450×75mm）の背面に150×150mmおよび150×75mmの大きさの異なる2つの四角形の模擬欠陥（欠損部）を設け、それらの欠損深さdとして15, 25, 35mmの3種類を設定した（**図-3**参照）。また、欠損部のない健全な供試体も作製した。使用したコンクリートは水セメント比50%、粗骨材最大寸法25mmの配合とした。

欠陥探査における発振・受振センサーの間隔は50mmとし、それらを供試体の短辺に平行に配置して**図-3**のA～Eの測点（健全部と欠損部の中心を通る測点）について測定した。ここでは、パルス幅5μsec、波形の取込み時間1μsecとして約32msecの波形データを取り込み、最大振れ幅の算定とFFTによる波形のスペクトル解析を行った。なお、測定は各測点において3回行った。

（1）最大振れ幅による欠陥評価

欠損深さd=35mmの測点Bの測定波形の一例を**図-4**に示す。また、欠損深さd=15, 25, 35mmおよび欠損なしの場合について、各測点における測定波形の最大振れ幅（測定波形の最大値と最小値の差：mV）を求め、それらの結果を**図-5**に示す。これらは3回の測定結果の平均を表している。さらに、欠損なし供試体のA～Eの最大振れ幅の平均値（ここでは94.4mV）で各測定結果を除し、これを最大振れ幅比として**図-6**に示した。

図-6の結果から、欠損深さdが大きいほど、欠陥部と健全部の最大振れ幅比の相違が明瞭になる傾向を示している。しかし、最大振れ幅比は、欠損なし供試体

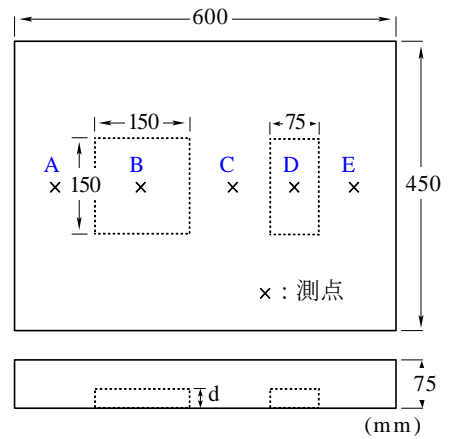


図-3 背面に欠損部を設けた供試体の形状寸法

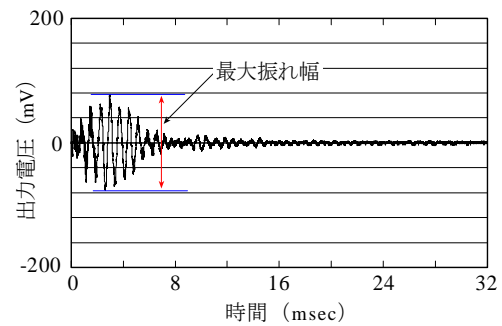


図-4 測点Bの測定波形の例（d=35mm）

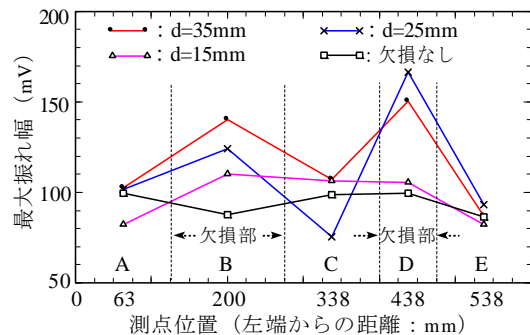


図-5 最大振れ幅の測定結果

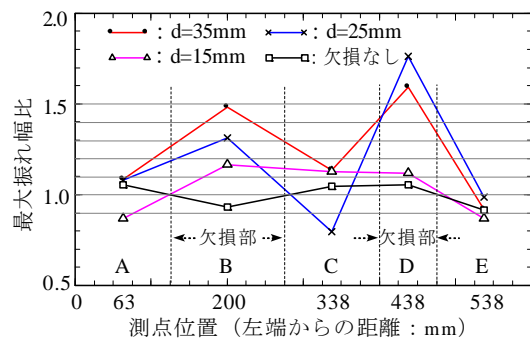


図-6 各測点の最大振れ幅比

においても0.91～1.06の範囲で変動しており、測定結果のばらつきが認められる。欠陥部の有無の推定は、測定結果のばらつきを考慮して行う必要があると思わ

れる。欠損深さ $d=25, 35\text{mm}$ では、欠陥部の最大振幅比が 1.3 以上になっており、欠損なしとの相違が比較的明瞭に現われている。一方、欠損深さ $d=15\text{mm}$ では、欠損なしの値との差が小さく、欠陥部の推定精度は低いと考えられる。

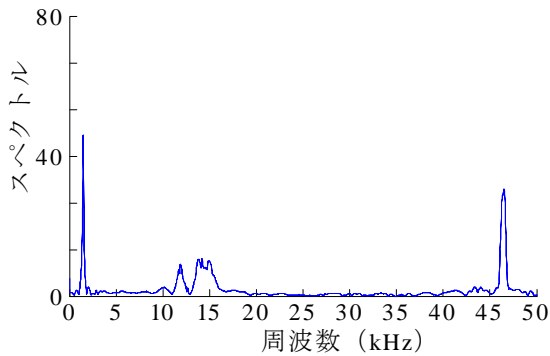


図-7 センサーの周波数特性

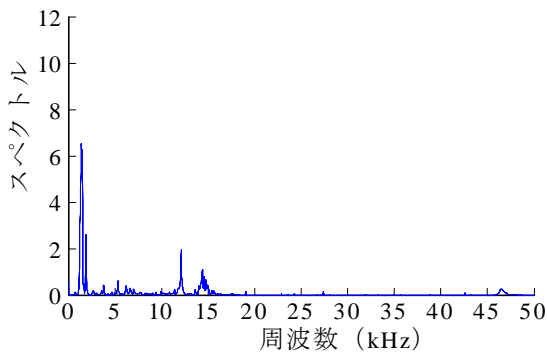


図-8 測点 B の周波数スペクトルの例 ($d=35\text{mm}$)

最大振幅による方法は、コンクリート版の厚みを定量的に調べることはできないが、欠損深さ $d=25, 35\text{mm}$ のように健全部に比べて厚みが大きく減少しているような場合には検出が可能であると思われる。

(2) 周波数スペクトルによる欠陥評価

センサーの周波数特性を調べるため、発振・受振センサーの先端を直接に接触させて波形を測定し、FFT によるスペクトル解析を行った。図-7 にセンサーの周波数特性を示す。センサーは、1.5kHz、15kHz および 47kHz 付近に卓越周波数が現れており、これらはセンサーの固有周波数と考えられる。なお、FFT の計算においては、出力電圧(mV)–時間関係の測定波形データ 32768 個を用いて、サンプリング時間 $1\mu\text{sec}$ としてスペクトル解析を行った。

図-8 は、欠損深さ $d=35\text{mm}$ の供試体について、測点 B で測定した波形データのスペクトル解析結果を示す。また、図-9 は測点 A、D の測定波形の例を、図-10 には測点 A、D の周波数スペクトルをそれぞれ示す。図

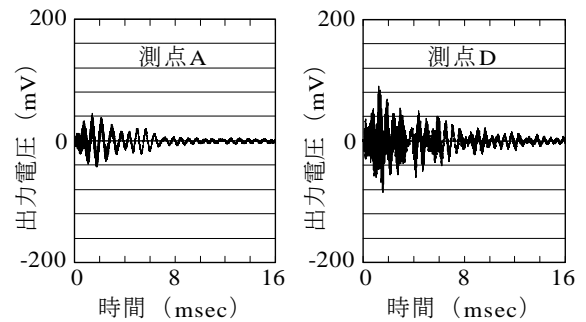


図-9 測点 A、D の測定波形の例 ($d=35\text{mm}$)

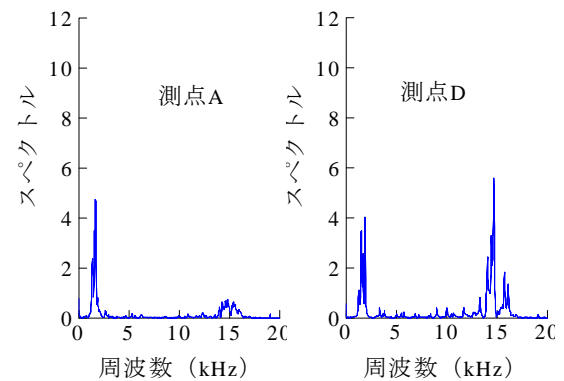


図-10 測点 A、D の周波数スペクトル ($d=35\text{mm}$)

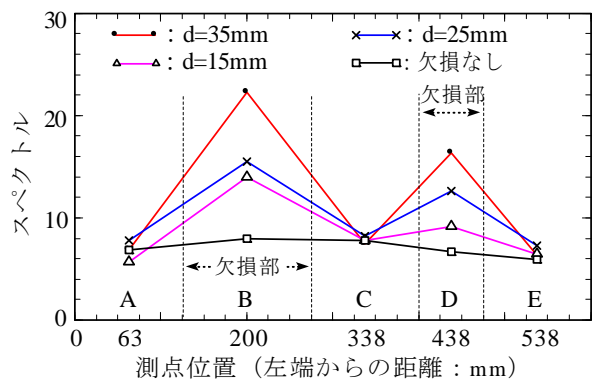


図-11 各測点の 3~10 kHz の周波数スペクトル



図-12 RC管の模擬欠陥の状況

－10の結果から、背面に欠損部がある測点Dの場合、1.5kHzと15kHz付近の2つの卓越周波数の間に多数の比較的小きな周波数スペクトルが現れており、これは背面に欠損のない測点Aと比較して、特徴的に現れていた。図-8の測点Bの結果も同様であった。そこで、3~10kHzの周波数スペクトルを積分して合計し、その値を各供試体測点について比較した。なお、ここでは同一測点について3回測定し、その平均値を用いた。

図-11は、各測点における3~10kHzの周波数スペクトルを合計した結果を表す。この結果によると、欠損部の面積が大きいほど、また、欠損の深さが大きいほどスペクトルの値が大きくなっている。この値の大小は、欠損部の大小とよく対応しており、また、最大振幅のパラメータと比較して、欠損深さd=15mmの探査精度も良いように思われる。3~10kHzの周波数スペクトルの値は、欠陥探査に有効なパラメータと考えられる。

また、3~10kHzの周波数スペクトル以外に、1.5kHzおよび15kHz付近の卓越周波数のスペクトルをパラメータとして欠陥探査の良否を検討した。この結果、卓越周波数のスペクトルを用いた欠陥部の探査精度は、3~10kHzの周波数スペクトルに比べて低いことがわかった。

2.3 鉄筋コンクリート管における欠陥探査

コンクリート版の試験結果から、3~10kHzの周波数スペクトルをパラメータとした場合、欠陥探査の精度が良いことがわかった。ここでは、このパラメータに着目し、模擬欠陥を設けた鉄筋コンクリート(RC)管の欠陥探査に本方法を適用した。図-12にRC管の外観を示す。RC管は、内径900mm、長さ1200mm、厚さ80mmの寸法を有し、RC管の外面には、模擬欠陥として20×20cmの大きさで欠損深さがそれぞれ10、20、30、40mmの欠損部を設けた。測定範囲は欠損部を含むように100×40cmの大きさとし、図中に示すように、管内面に管軸方向20cm間隔でa~fの6ライン、円周方向に5cm間隔で9測点(1~9)を設け、合計54測点を測定した。超音波試験は、センサー間隔を50mm、パルス幅5μsec、波形の取込み時間1μsecとして、約32msecの波形データを記録した。

図-13および図-14は、それぞれ、健全部の測点a-1および欠陥部の測点e-5における測定波形と周波数スペクトルを表している。欠陥部の測定波形の最大振幅は、健全部のものに比べて大きくなり、波形振幅の変化がうかがえる。

各測点における3~10kHzの周波数スペクトルの合計値をa~fの6ラインについて比較した結果を図-15に示す。欠損深さが大きい測点ほどスペクトルは大きくなり、健全部との差は大きくなっている。また、周波数スペクトルのコンタ図を図-16に示す。欠損深さ

10mmでは探査精度が低いものの、欠損深さが大きい部分ほどパラメータの値が大きくなり、欠陥部の位置とも比較的良く対応していることがわかった。

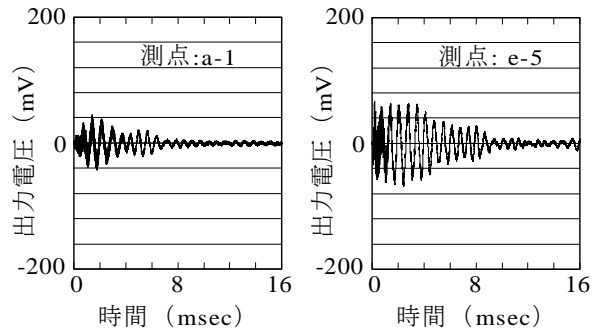


図-13 測点 a-1, e-5 の測定波形の例

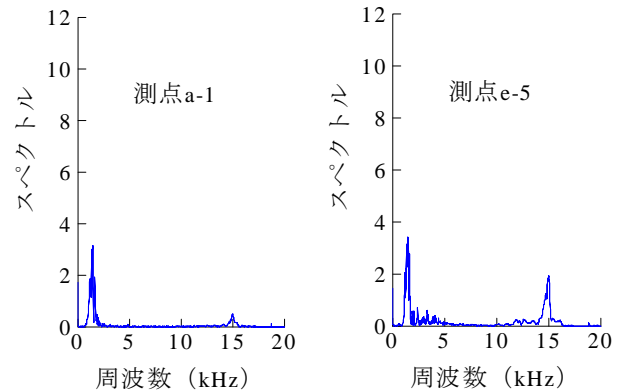


図-14 測点 a-1, e-5 の周波数スペクトル

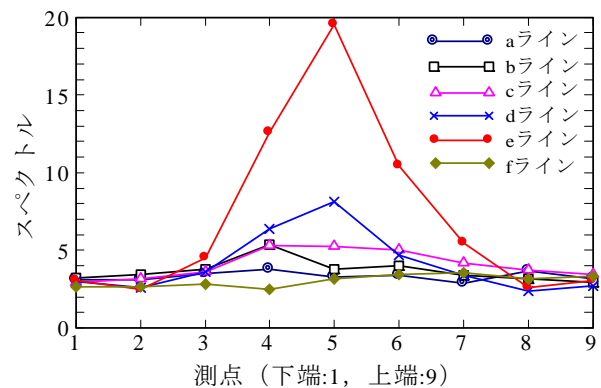


図-15 各測点における周波数スペクトル

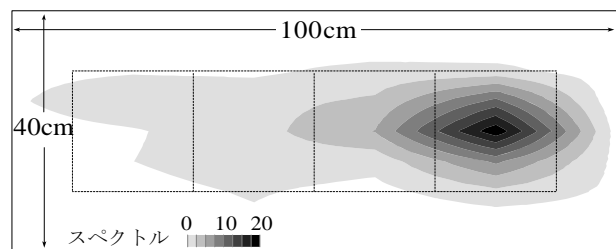


図-16 周波数スペクトルのコンタ図

3kHz～10 kHz の周波数スペクトルは、欠損深さ 10mm では探査精度が低かったものの、20～40mm では欠陥を比較的精度よく推定できており、コンクリート管の欠陥探査に有効なパラメータであるといえる。

3. PC 管水路の現地調査への適用

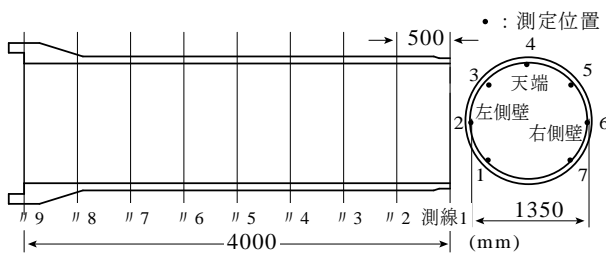
3.1 現地調査の概要

現地調査は、三重県の名張市と四日市市に位置する 2 か所の農業用 PC 管水路を対象とした。それぞれ施工後約 40 年および 30 年経過しており、近年、PC 管の破損事故も発生している。測定は、非灌漑期に管内の水抜きを行い、空水の状態で管内部に測定器を持ち込んで行った。

3.2 現地調査の結果

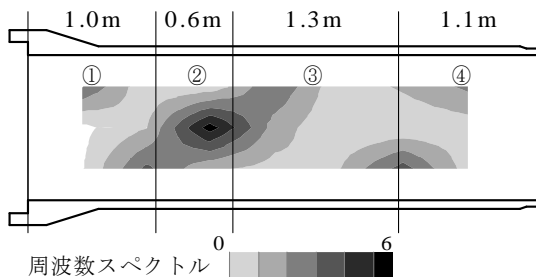
(1) 調査地区：名張市

PC 管の寸法および測定位置を図-17(a)に示す。挿し口の端部付近に測線 1 を設定し、測線の間隔を 500mm として 9 測線を設定し、それぞれ内面の天端を含む 7 測点で測定した。ここでは、最大振幅と 3kHz～10 kHz

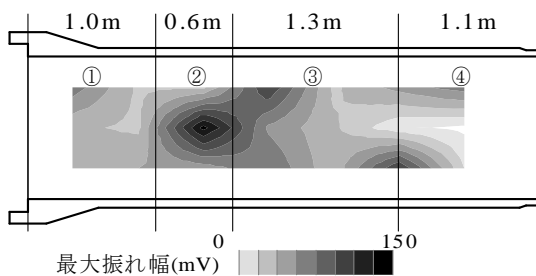


(a) PC 管における測定位置

- ①：健全 ②：浸食の程度大、PC鋼線の露出、腐食あり
③：浸食の程度小 ④：健全



(b) 測定結果と目視結果の比較 (スペクトル)



(c) 測定結果と目視結果の比較 (最大振幅)

図-17 PC 管の調査概要 (調査地区：名張市)

の周波数スペクトルのパラメータでコンタ図を求め、土を掘削して目視による管上面の劣化状況と比較した。

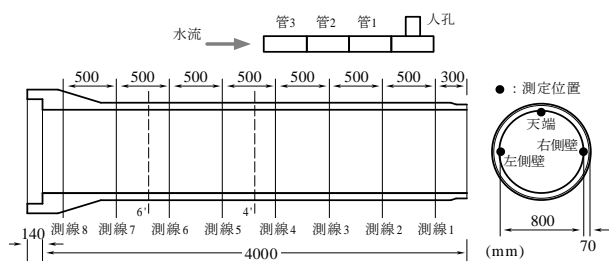
PC 管の継手部付近は、評価パラメータの値が大きくなる傾向があり、これはカバーコートがなく管厚が小さいことや、端部近傍の測定であるため端面が影響していることなどによると考えられた。このため、継手部の測線 1, 9 を除いた測定データによりコンタ図を描き、目視による劣化状況と比較した。

図-17(b)および(c)に示すように、カバーコートモルタルが浸食されて PC 鋼線が露出し腐食していたところではパラメータの値が大きくなり、欠陥と比較的よく対応した結果となった。また、最大振幅幅と周波数スペクトルによる評価結果は大体同じような傾向を示した。

(2) 調査地区：四日市市

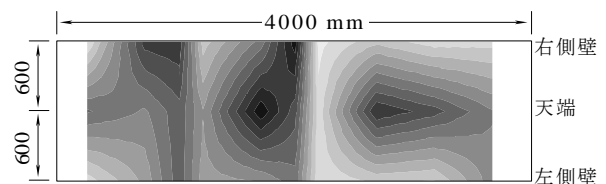
PC 管の寸法および測定位置を図-18(a)に示す。ここでは、最大振幅幅をパラメータとして欠陥評価を行った。調査は人孔側より 3 本の PC 管 (それぞれ管 1, 管 2 および管 3) を対象とした。

管 1 では挿し口の端から 300mm に測線 1 を設定し、

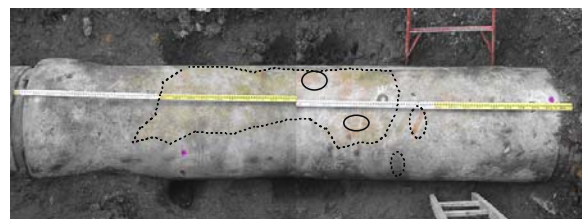


(a) PC 管における測定位置 (管 1)

- 損傷・劣化の程度 小 ← → 大
最大振幅幅 (mV) 3 5 7 9 11 13 15



(b) 最大振幅幅のコンタ図 (管 1)



——：PC鋼線破断箇所：鋼線の錆付き範囲

(c) 掘削により観察した PC 管の外面の状況 (管 1)

図-18 PC 管の調査概要 (調査地区：四日市市)

全部で10測線を設定した。なお、測線1、測線4'および測線6'では管厚の測定も行った。管2および管3では測線1、3、5、7の4測線について測定した。また、管1と管2の継手部、管2と管3の継手部についても測定した。

各測線における測定位置は天端および左右側壁（天端からそれぞれ左右600mmの位置）とした。測定点数は、管1で30点、管2および管3では各12点、管継手部で各3点、合計60点とした。本調査では健全部における探傷感度の設定ができなかったため、超音波管厚測定結果より管厚の薄い部分（管1における測線1の右側壁）を基準として探傷感度の設定を行った。

各測点における最大振れ幅の数値を表-1に示す。管の継手部では他に比べて最大振れ幅が大きくなっているが、これは前述と同様の理由と考えられる。また、管1-2継ぎ手部の左右側壁は、同継手部の天端や管2-3の継手部に比べて3分の1以下の振れ幅となっており、各継手部の接合状態に何らかの相違があると推測される。

測定波形の形状より最大振れ幅が健全部の値4.5mVを越えている測点については何らかの損傷または劣化部が存在する可能性が高く、調査対象とした3本のPC管は損傷・劣化が分布していると思われた。また、最大振れ幅の値は管2において大きくなっており、最も劣化し

ている可能性が高いといえる。管1について最大振れ幅の分布をコンタとして図化したものを図-18(b)に示す。最大振れ幅の大きい部分を損傷・劣化が大きいとした場合、管の中央部分で天端から右側壁の劣化が大きいと判定される。

管内面からの調査後、掘削によって管1および管2の外面の状況を観察した。管1の外面の状況を図-18(c)に示す。この結果によると、コンタ図の損傷・劣化分布に近い位置にPC鋼線の露出や錆の発生、破断などがみられ、探査結果と比較的よく対応していた。一方、管2については、管1よりも損傷・劣化が大きいとの測定結果となったが、管2の外面の観察結果によるとカバーコートモルタルはかなり残っており、劣化はあまり進行していないことが確認された。この結果は超音波共振法による結果と異なるものであった。各管において健全部の位置を把握し、その最大振れ幅を基準の指標にできれば、探査精度の向上が期待できるものと思われる。

4. まとめ

本研究では、PC管の内面から外面の欠陥を検査する方法として、超音波共振法と超音波スペクトル解析を組み合わせた方法を適用した。本方法の適用性を検証するため、模擬欠陥を設けたコンクリート版ならびに鉄筋コンクリート管を対象として非破壊試験を行った。その結果、測定波形のスペクトル解析結果から3~10kHzの周波数スペクトルをパラメータとした場合、コンクリート版やRC管の外面の欠陥を比較的精度よく探査できることがわかった。

また、本方法をPC管水路の現地調査に適用し、その探査精度ならびに適用上の留意点などを検討した。本方法を適用する場合、基準となる健全部での探傷感度の設定や管の端部で測定値が大きくなる傾向があることなど、課題や留意点のあることがわかった。

参考文献

- 1) 竹中 実, 吉岡敏幸, 河田直美: 老朽化したPC管の判定と対策について, 農業農村工学会誌, vol.76, No.1, pp.29-32, 2008.1
- 2) 小泉和広, 伊藤保裕, 毛利栄征: 老朽化したPC管を非破壊検査で調査・診断, セメント・コンクリート, No.783, pp.18-26, 2012.5
- 3) 茨田 匠, 吉村 睦, 河端俊典, 石黒 覚: 横波超音波共振法による農業用水管路の探傷の有効性, 農業土木学会論文集, Vol.73, No.3, pp.123-128, 2005.6
- 4) 石黒 覚, 和田隆弘: コンクリートとモルタルの接着面における欠陥探査に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.33, No.1, pp.1727-1732, 2011.7

表-1 測定波形の最大振れ幅 (単位:mV)

測点 管 No-測線 No	最大振れ幅		
	左側壁	天端	右側壁
1-1	8.58	9.10	4.60
1-2	4.94	11.44	4.42
1-3	5.20	13.00	5.72
1-4	4.16	4.42	3.64
1-4'	9.62	11.44	14.56
1-5	8.06	14.82	9.36
1-6	7.54	8.06	5.46
1-6'	10.66	10.66	12.74
1-7	7.28	8.84	12.48
1-8	4.42	10.14	3.90
管 1-2 継手部	11.18	53.82	18.72
2-1	17.16	15.86	8.84
2-3	15.60	15.60	8.32
2-5	13.52	14.56	7.02
2-7	11.96	20.28	19.76
管 2-3 継手部	66.30	58.24	62.14
3-1	11.96	11.44	10.14
3-3	7.28	15.86	15.86
3-5	6.76	10.40	10.14
3-7	6.76	7.28	4.42