

劣化 PC 管の調査・診断手法

伊藤 保裕

PC 管の老朽化に伴い、近年、管本体が破裂して大規模な浸水被害、地表面の陥没などに至る事例も顕在化しつつある。しかし、PC 管は埋設されているため劣化の程度の把握が難しく、特に、劣化は管外面から進行するため、これまでは、劣化状況の確認・診断は試掘調査によらざるを得なかった。しかし、上部土地利用との調整等の問題から試掘が困難な場合も多いため、地中に埋設されている PC 管を掘削することなく、管内部から電磁誘導や超音波により劣化度を非破壊診断する手法を開発した。

キーワード：管水路、PC 管、機能診断、劣化診断、非破壊診断、電磁誘導、超音波

1. はじめに

(独)水資源機構（以下、「機構」という）が管理している水路施設には、約 100 km のコア式プレストレストコンクリート管（以下、「PC 管」という）があるが、敷設後 30～40 年を経過し老朽化してきており、近年、管本体が破裂して大規模な浸水被害、地表面の陥没などに至る出水も顕在化しつつある¹⁾。

このような出水は、発生が突発的で、大規模なため、通水停止を余儀なくされるとともに、周辺の浸水被害など深刻な被害を及ぼす恐れがある（写真—1）。



写真—1 PC 管破裂と地表面陥没事例

しかし、埋設されている PC 管の劣化状態は、地表を中心とした日常の水路巡視では確認することが困難で、破裂・出水の予測がつかない現状にある。また、PC 管の劣化は、管外面から進行するため、これまでは劣化の状況の確認・診断は、試掘調査によらざるを得なかった。しかし、現実の問題として、上部土地利用との調整等の問題から試掘が困難な場合も多いことから、破裂による出水を未然に防ぐため、管内部からの非破壊調査により、劣化診断する手法の確立が急務であった。

このため、機構では、地中に埋設されている PC 管

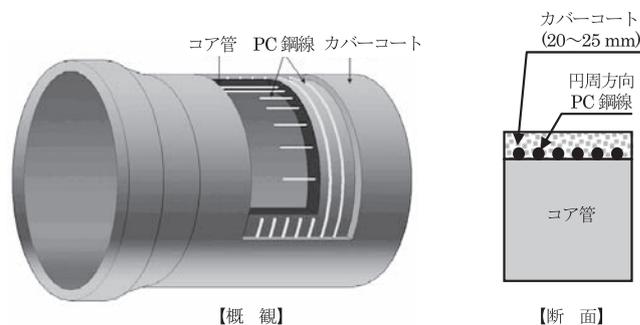
を掘削することなく、管内部から電磁誘導や超音波により劣化度を非破壊診断する手法と、この技術を核とした PC 管路線の調査・診断手法について、(独)農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所および新技術研究開発組合（代表者：(株)ダイヤコンサルタント）と共同で開発した。

以下に、非破壊診断手法の内容を中心に紹介する。

2. PC 管の構造と劣化のメカニズム

(1) PC 管の構造

PC 管は、内外圧に対抗するために、コア管、コア管にプレストレスを与える PC 鋼線、PC 鋼線を保護するカバーコートモルタル（以下、「カバーコート」という）で構成されている（図—1）。



図—1 PC 管の構造概要（概観、断面）

円周方向の PC 鋼線は、1 本の鋼線を連続して円周方向に巻きつけ端部を固定しているため、カバーコートの付着力が失われた場合、1 箇所破断により PC

管の強度が失われるという特徴を有する。

(2) 劣化のメカニズム

PC 管本体の劣化は、「地下水や土壌に含まれる侵食性因子によって PC 鋼線を保護するカバーコートが中性化・薄肉化すると、カバーコートの保護機能が低下し、PC 鋼線が発錆し破断に至ると、耐力は急激に低下し、管本体が内外圧に耐えられなくなり破断する。」というメカニズムによるものが大半である。従って、侵食性因子の有無により、経過年数が同様でも劣化状況が全く異なる場合もあるため、PC 管の劣化診断を行うためには、PC 管が劣化しやすい埋設環境にあるかの確認が重要であるとともに、劣化の程度を定量的に調査・診断する手法が必要となる（写真—2）。



写真—2 同様の経過年数で劣化状況が異なる例

3. 管内部からの非破壊調査

(1) 管内部からの非破壊調査の必要性

PC 管の劣化は、主に管外面から進行するため、劣化状況の確認は、試掘により管外面の状況を直接確認することが望ましいが、試掘には、上部の土地利用上の制約の問題や、埋設深が深い場合や地下水位が高い場合などは試掘費用が高むという問題があり、埋設されている PC 管全線を試掘により調査するのは現実的に不可能である。このため、管内からの非破壊調査によって PC 管の劣化度を効率的に調査する手法の確立が必要となる。

(2) 非破壊調査手法の選定

PC 管の劣化を診断するための非破壊調査は、2つの視点で行うこととした。

第1の視点は、PC 鋼線が発錆・破断していないかの診断で、この情報は、まさに PC 管が末期的な状況か否かの判断情報となる。

第2の視点は、PC 鋼線の保護機能であるカバーコー

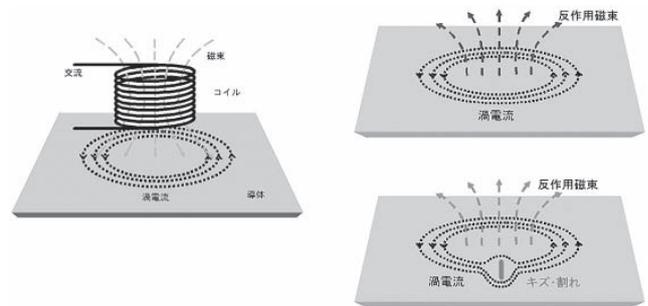
トの健全部分の厚さの測定で、この情報は、計画的な予防保全のために必要な情報となる。

それぞれ、既存の調査・診断手法や新技術の中から適用可能性を検討し、PC 鋼線が発錆・破断診断には電磁誘導を用いた調査法（以下「電磁誘導法」という）が、(株)ダイヤコンサルタントと三菱マテリアル建材(株)により新たに開発（平成18年6月特許出願中：特願2006-166019）されたため、これを採用した。また、カバーコートの健全部の厚さ測定には、コンクリートの部材厚測定において実績のある超音波を用いた調査法（以下「超音波法」という）を採用することとした。

(3) 電磁誘導法（PC 鋼線の劣化診断）

(a) 測定の原理

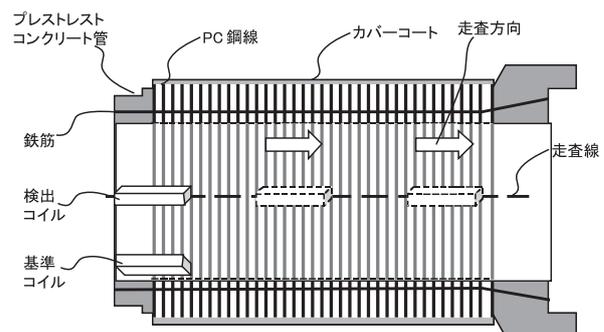
コイルに交流電流を流すと、磁束の変化により導体には渦電流が発生する。この渦電流による反作用磁束の変化を別のコイルで検出し、渦電流の変化を検知する。導体にキズ等があると、渦電流はそれを迂回して流れようとするため、正常時とは異なる反作用磁束となる。電磁誘導法は、この正常時との違いを計測することで、導体のキズ等（PC 管では PC 鋼線が発錆・破断）を診断しようとするものである（図—2）。



図—2 電磁誘導法の測定原理

(b) 測定方法

PC 管での電磁誘導法の測定は、図—3に示すように、基準コイルで磁場を発生させ、PC 鋼線に発生した誘導電流の変化を検出コイルを移動させて検出する。



図—3 電磁誘導法測定方法

測定に当たっては、コアコンクリートに縦方向に配置されているPC鋼線の影響を極力排除するため、予め鉄筋探査によりコアコンクリートに配置された縦方向のPC鋼線位置を調査し、それに当たらないように走査線を設定する。

(c) 劣化度の判定

健全な管の場合の出力電圧値のパターンは、急激な電圧値の変動は見られず、中央部付近ではフラットな形状を示すのに対し、PC鋼線の発錆・破断した管では、大きく出力電圧値が変動する。

実際のPC管での測定例を図-4に示す。上図(健全管)ではフラットな形状を示すが、下図(PC鋼線破断管)では距離1,000mm, 2,500mm付近で大きな電圧変動が見られ、同付近で試掘した結果、破断を確認している。

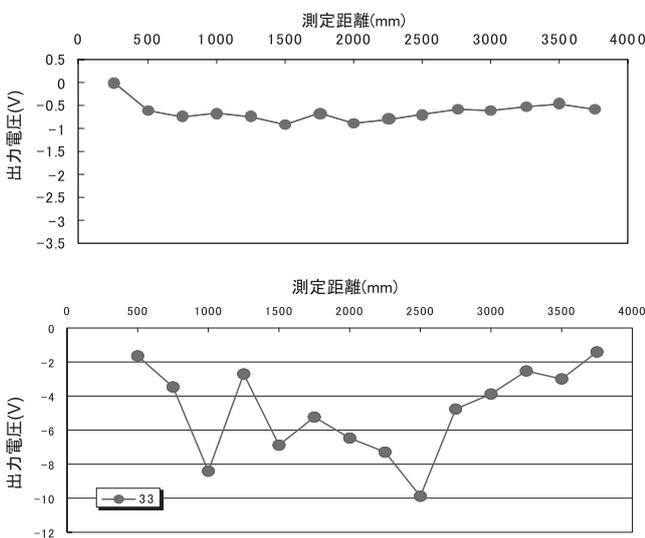


図-4 測定例(上:健全管, 下:PC鋼線破断管)

変動の程度から劣化度を評価する指標として、最大出力電圧差と標準偏差に着目した。最大出力電圧差は、1箇所でも大きな変動があれば大きな値として測定されるので、局所的な破断や著しい劣化を判定するのに適している。一方、標準偏差は、出力電圧値のバラツキの割合を示すもので、その管の全体的な劣化の割合を評価するのに適している。

電磁誘導法による測定結果と、試掘調査によるPC鋼線の劣化状況の確認結果とを比較し、最大出力電圧差で概ね3V、標準偏差で概ね1Vを超えるとPC鋼線の破断が確認される場合が見られること、最大出力電圧差で概ね1V、標準偏差で概ね0.5VまではPC鋼線の発錆が見られないことを確認した(図-5)。

以上のことを踏まえて判定指標を次のように設定した(表-1)。

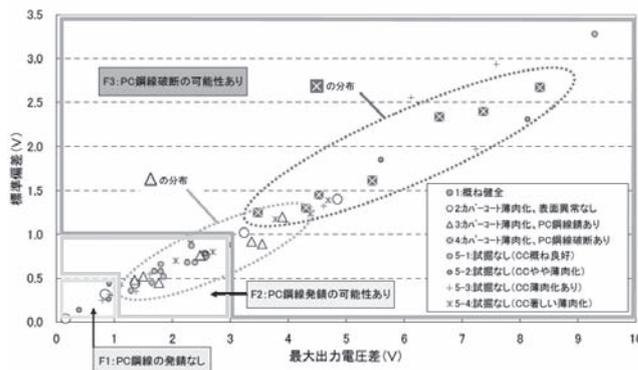


図-5 電磁誘導法の測定結果と劣化状況の関係

表-1 電磁誘導法によるPC鋼線の劣化度判定表

判定区分	最大出力電圧差	標準偏差	発錆・破断の有無
健全	1.0V未満	0.5V未満	発錆なし
要注意	1.0～3.0V未満	0.5～1.0V未満	発錆の可能性あり
劣化	3.0V以上	1.0V以上	発錆・破断の可能性あり

(4) 超音波法(カバーコートの劣化診断)

(a) 測定の原理

超音波法は、PC管内面の対象測定箇所超音波(縦波)を入射し、反射してくる伝播時間を計測し、対象PC管の伝播速度(音速値)との関係から、伝播距離(管厚)を求める方法である(図-6)。

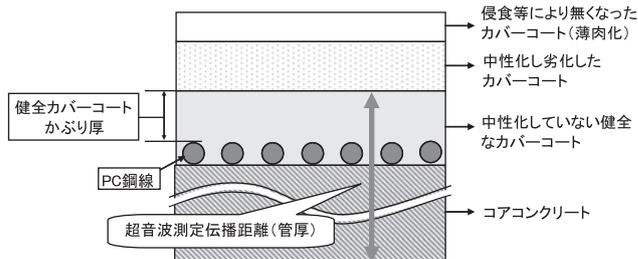


図-6 超音波による管厚測定模式図

超音波は、部材の変化点で反射してくることから、健全部と劣化部または土との境界での反射波を読み取り、健全部までの伝播時間を計測する(図-7)。

超音波法により測定された伝播時間は、PC管の健全部の全厚(コアコンクリート+健全カバーコート)に対するものであることから、これから、コアコンクリート厚および設計PC鋼線径を差し引いて健全なカバーコートかぶり厚さを算出する。

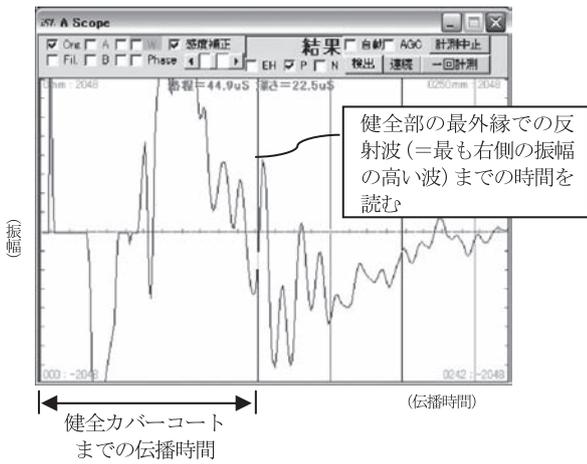


図-7 波形データの例

(b) 測定方法

健全部の全体厚(コアコンクリート+健全カバーコート)の算定に用いる音速値は、実測結果より、総合音速値と管径の関係を整理し、これを用いることとした(図-8)。

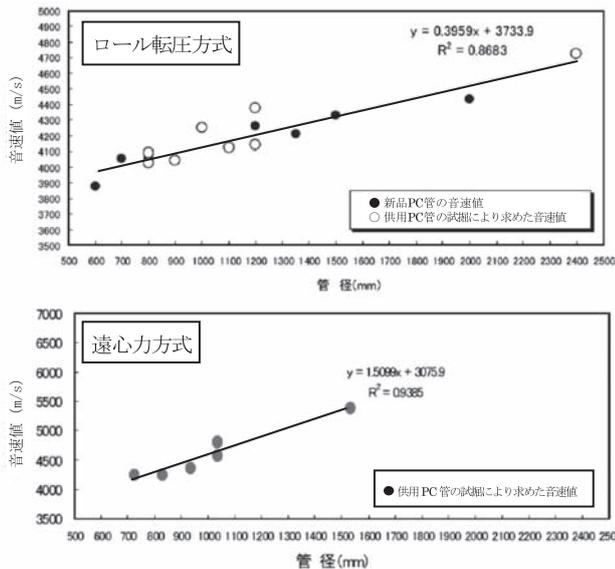


図-8 PC管の管径と複合音速値の関係

測定機器は、コアコンクリートが高強度(圧縮強度80 N/mm²以上)で、かつ粗骨材が密なため超音波が透過しにくいこと、測定厚が75~145 mm(φ800~φ2,400)と薄く、かつ外側の20mm程度のカバーコートの状況を精度よく測定する必要があることなどを踏まえて、次の点に留意し選定した(写真-3)。

- ①各部材に対応した周波数帯域をカバーできる広帯域(20 kHz~1,000 kHz程度)の発振・受振が可能であること。
- ②反射波形をより鮮明にとらえられるよう送信電圧が可変であること。

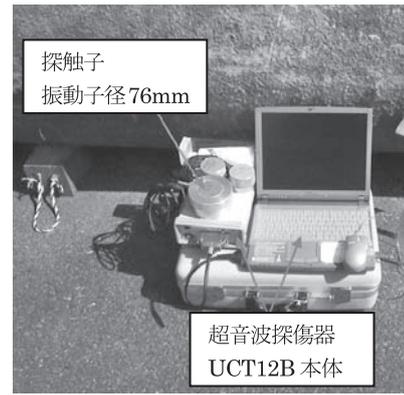


写真-3 超音波測定機器

- ③入射エネルギーが大きく、かつ不感帯の範囲が小さいこと。

また、測定に当たっては測定精度向上の観点から、次の点にも留意した。

- ①PC管内面(曲面になっている)に探触子が密着しないと、測定精度に影響することから、通常用いるカップリング材に加え専用のアタッチメント(アクリル製)を用いることとした。
- ②コアコンクリート厚にも製造時の誤差があることから、レーザー距離計を用いて内径を実測し、型枠外径(比較的高精度で製作されている)との差より測定箇所ごとに算定することとした。

これらにより、超音波法の測定精度は、音速値および部材厚が既知のPC管による室内基礎試験において、測定誤差0.2~1.1 mm程度であることを確認した。

また、機構の14地区において、超音波法による測定とともに、試掘しほぼ同じ箇所をチップングして健全カバーコートかぶり厚を実測し、超音波法およびチップングによりそれぞれ算定した母平均の差を、有意水準5%で検定した結果、有意差なしを確認した。

(c) 劣化度判定方法

超音波法により測定した健全カバーコートかぶり厚値は、表-2により判定することとした。

表-2 超音波法による測定結果判定表

健全カバーコートかぶり厚	判定区分
複数の測定値または95%信頼区間の下限値が10 mm以下	劣化
複数の測定値または95%信頼区間の下限値が10 mmより大きく12 mm以下	要注意
上記以外	健全

「コンクリート診断技術(社)日本コンクリート工学協会」²⁾では中性化残りが約8 mmで鉄筋の腐食が開始する場合があるとしているが、PC管の特徴として、PC鋼線が1箇所でも破断するとPC管の破裂につな

がる場合があること、気中部での中性化よりも水が関与する炭酸侵食による中性化・薄肉化の方がより厳しい環境と考えられること、測定値にばらつきがあることも考慮し、より厳しい10mmを基準値とした。

この評価基準値の妥当性について、現地での測定結果と実際の劣化状況の確認結果とを対比し検証した。

PC鋼線に発錆・破断が見られたケースではほとんどのケースで10mm以下の計測値となっている。なお、健全カバーコートかぶり厚が10mmを下回る場合でもPC鋼線に錆びがない場合も見られるが、これは、カバーコートモルタルの劣化環境にはあるが、鋼材の劣化環境にはない場合と推察される(図-9)。

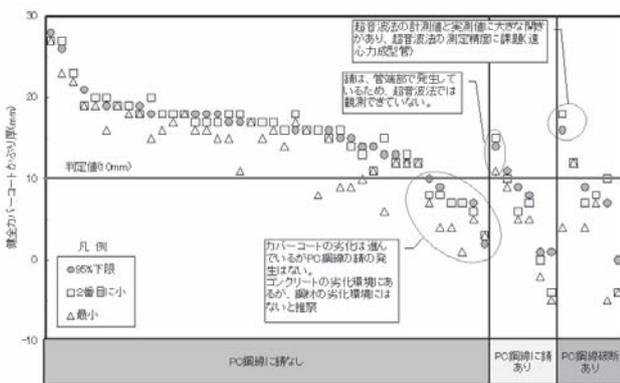


図-9 超音波法測定値と劣化状況

予防保全を適切に行うためには、劣化に至る前の要注意時点をどうとらえるかが重要となる。これまでの調査結果から、経過年数と腐食深さの関係を \sqrt{t} 則に従うとして整理した結果、劣化速度に幅はあるが、20年程度の経過で健全カバーコート厚が12mm程度まで劣化が進行している場合には、今後10年程度で基準値の10mmまで劣化が進行する可能性があることを確認したことから、12mmを要注意基準値とした。

(5) 劣化度の総合評価

非破壊調査による劣化度判定は、電磁誘導法と超音波法の判定結果を組み合わせ、グレードI~IVに区分評価するものとした(表-3)。

なお、電磁誘導法は、PC管の破断に直結するPC鋼線の発錆・破断を直接評価することを考慮し、電磁誘導法の判定結果に重みをつけることとした(表-4)。

4. おわりに

地中に埋設されているPC管を掘削することなく、

表-3 各グレードの考え方

グレード	考え方
I	健全な状態。当面問題ないが、10年程度で再調査を実施し状況確認が望ましい。
II	今後10年程度でグレードIII、IVに至る可能性があるため、5年程度で再調査を実施し、劣化進行状況を確認する必要がある。
III	PC鋼線発錆の可能性が高く、早期に対策を講ずる必要がある。
IV	PC鋼線破断の可能性が高く、緊急に対策を講ずる必要がある。

表-4 非破壊調査による劣化度総合判定区分表

		電磁誘導法(PC鋼線の劣化)		
		健全	要注意	劣化
超音波法 (カバーコートの劣化)	健全	I	II	III
	要注意	II	III	IV
	劣化	III	III	IV

管内部から非破壊診断する手法について紹介した。

本手法は、突発的な破裂のリスクを含み予防保全計画を立てにくい施設であったPC管の健全度評価を定量的に行うことができるものであり、ストックマネジメントを行う上で有効な手段になると考えている。

なお、実際のPC管路線の健全度評価においては、当該路線のPC管の構造や埋設経過年数等の既存資料の収集・整理、水質・土壌・地下水位、周辺土地利用状況などPC管の埋設環境(劣化環境)についての調査等により、劣化が想定される路線(区間)をある程度絞り込んだ上で、調査対象管(代表管)を抽出し、今回紹介した内面からの非破壊調査や試掘による調査によって劣化度を定量的に確認し、これらの結果を総合的に判断・評価することが重要と考える。

最後に、本手法が、各地区のPC管の機能診断に活用され、適切な維持管理の一助となれば幸いである。

JICMA

《参考文献》

- 1) 水島淑博, 伊藤保裕, 辻本昌弘, 小泉和広, 毛利栄征, 「劣化PC管の調査・診断手法の検討」, 水士の知 76 (3), PP221 ~ 225, 2008.3
- 2) コンクリート診断技術'09 [基礎編], (社)日本コンクリート工学協会, P38

【筆者紹介】

伊藤 保裕 (いとう やすひろ)
(株)水資源機構総合技術センター
水路グループ長

