

論文 超音波法による硫酸劣化深さの推定手法に関する検討

山本 大介*1・佐川 康貴*2・濱田 秀則*3・松下 博通*4

要旨：超音波を用いた下水管渠の劣化診断手法における精度向上を目的とし、鉄筋コンクリート中の超音波伝播経路を明確にするために、基礎的実験を行った。硫酸により劣化したコンクリートは、表層が激しく劣化するが、より深い箇所では健全であることから、脆弱層および健全層の二層構造を模擬したモデル供試体を作製し、超音波の伝播経路を調べた。その結果、走時曲線を用いた硫酸劣化深さの推定法を提案し、実環境下で劣化した下水管渠に適用した結果、実用可能な誤差範囲で硫酸劣化深さを推定することができた。また、超音波伝播速度比の導入による簡便な硫酸劣化深さの推定法を提案した。

キーワード：下水管渠, 超音波伝播速度, 非破壊試験, 硫酸劣化

1. はじめに

都市部における下水道施設は比較的早く建設されたものが多く、また予定供用期間よりも短期間で劣化する事例も報告されている。下水管路施設の腐食点検は数多く行われているが、従来の調査手法ではコンクリート内部の劣化状況を把握することは困難である。今後、高度経済成長期に建設された膨大な下水道施設が一斉に老朽化時期を迎えることが懸念されており、有効な下水管路施設の劣化診断手法の確立が急務とされている。

本論文では、非破壊・非掘削で行う下水管渠の診断手法の確立を目的とし、その基礎的実験として、硫酸劣化を受けたコンクリート中を伝播する超音波特性を明らかにするとともに、超音波による下水管渠の硫酸劣化深さを推定する手法について検討した。

2. 本論文の位置付け

コンクリート製下水管渠の診断手法を確立することを目的とし、著者らは既往の研究¹⁾において、硫酸劣化した下水管渠の調査を行った。

まず、硫酸による劣化深さを求めるため、フェノールフタレイン溶液を管渠断面に噴霧し、中性化深さを求めるとともに、管渠内側におけるコンクリート表層のビッカース硬さの測定を行った。その結果、下水管渠の硫酸による劣化について一般的に示される機構²⁾と同様に、管上部および水面位置付近の劣化が激しく、中性化深さが大きいこと、また、供用中に嫌気性であった管下部ではほとんど劣化が見られないことを確認した。また、中性化している部分ではビッカース硬さや超音波伝播速度が小さく、ビッカース硬さが大きく変化する深さ（ビッカース劣化深さ）は、中性化フロント付近と一致することを明らかにした。

次に、管上部を載荷位置とした曲げ強度試験を行った。載荷位置を管上部としたのは、埋設管では土圧の鉛直荷重が主荷重であり、かつ劣化機構上、管上部が硫酸劣化しやすく構造上弱点となることが予測されるためである。ここで、管上部の曲げひび割れ発生荷重 P は式(1)のように表せる。

$$P = \frac{f_t \times b}{6 \times 0.318 \times r} \times h^2 \quad (1)$$

ここに、 f_t ：コンクリートの引張強度 (N/mm²)、 r ：管の半径 (mm)、 h ：管厚 (mm)、 b ：載荷幅 (mm)

式(1)より、下水管渠の呼び径（半径）が等しく、載荷幅が等しい時、ひび割れ荷重 P はコンクリートの引張応力 f_t と管の管厚 h の二乗に比例することが実験的にも明らかになった（図-1）。

供用中の下水管渠の劣化調査を行う際、中性化深さやビッカース硬さを求め、健全厚さを求めることは現実的ではない。そこで、超音波法を用い、超音波伝播速度から劣化深さを推定できれば、初期の管厚から劣化深さを差し引くことで健全厚さを求めることができ、曲げひび

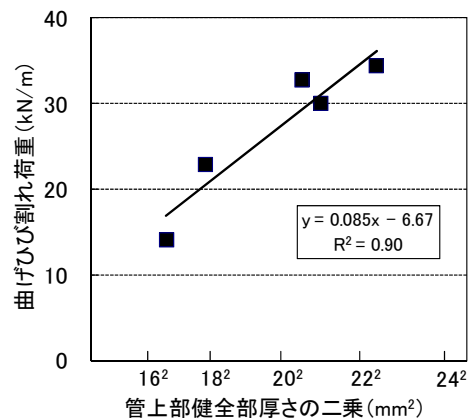


図-1 管上部の健全厚さ二乗と曲げひび割れ荷重の関係

*1 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 技術職員 修士 (理学) (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 福岡建設専門学校 校長 工博 (正会員)

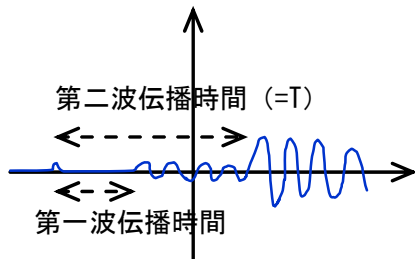


図-2 オシロスコープによる超音波波形

割れ荷重が算出可能になるものと考えられる。

本論文では、硫酸によるコンクリートの劣化深さを、超音波法により推定する方法について検討するため、モデル供試体による実験、および、劣化により交換された下水管渠を用いた実験を行った。

3. モデル供試体による実験の概要

劣化した下水管渠内側から表面法で超音波伝播時間を測定した。オシロスコープで観察すると、波形は図-2のような形状を示し、波形が途中から変化していた。本論文では、初めに見られる振幅の小さな波を第一波、その後見られる振幅の大きな波を第二波と呼ぶ。第二波から計算される超音波伝播速度は中性化深さ等と相関があり¹⁾、下水管渠の劣化状況を評価できる可能性があると考えられるが、本研究では、このことについて詳細に検討した。

本実験では、モデル供試体を作製し、脆弱層が超音波伝播経路に及ぼす影響（シリーズ1）、鉄筋が超音波伝播経路に及ぼす影響（シリーズ2）、およびコンクリートの含水率が超音波伝播速度に及ぼす影響（シリーズ3）について検討した。

3.1 超音波伝播速度の測定方法

本実験では、弾性波である縦波と横波を用いて実験を行った。横波は、液相・気相中は伝播せず、固相中のみを伝播する。縦波は、液相・気相・固相中を伝播する³⁾。

使用した振動子は縦波 50kHz・横波 50kHz であり、印加電圧 1000V、サンプリング周波数 10MHz で計測を行った。また測定には表面法を用いた。表面法では振動子間隔が短い場合、見かけ上超音波伝播速度が大きくなるため、振動子間隔の補正が必要となる。本実験では予備実験を行い、振動子間隔の補正值 α を求めた（図-3）。真の超音波伝播距離を $L_c - \alpha$ とし、伝播時間を T_c とする

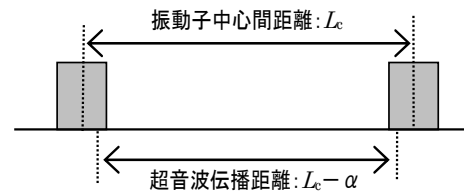


図-3 超音波伝播距離の補正方法

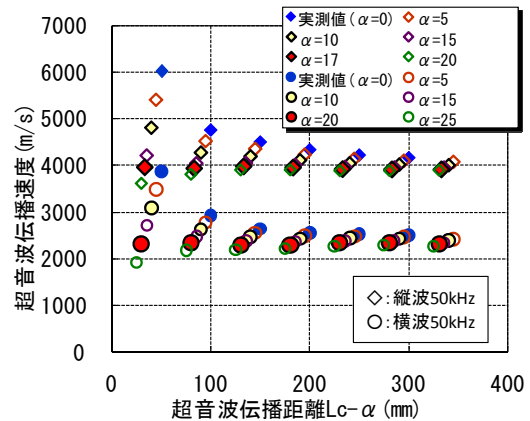


図-4 α を変化させたときの超音波伝播速度と超音波伝播距離 $L_c - \alpha$ の関係

と、真の超音波伝播速度 v は式(2)で算出される⁴⁾。

$$v = \frac{L_c - \alpha}{T_c} \quad (2)$$

振動子間隔が変化しても v が一定となる α を求めた（図-4）。その結果、縦波 50kHz : $\alpha=17\text{mm}$ 、横波 50kHz : $\alpha=20\text{mm}$ を得た。本論文における超音波伝播速度とは、この α を加味したものである。

3.2 シリーズ 1：二層構造コンクリート供試体中を伝播する超音波の伝播経路

実環境下の下水管渠の硫酸劣化では、コンクリートの二水石膏化が管内表面から内部へ進行する。また、劣化した部分と劣化していない部分には急激な材質変化がある。この劣化状態をモデル化するため、脆弱層と健全層からなる二層と捉え、強度の異なる材料からなる二層構造供試体を作製し、その伝播経路について検討した。

供試体は脆弱層をモルタル、健全層をコンクリートとする二層構造とし、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）、海砂（表乾密度 2.56g/cm^3 、吸水率 1.56%）、フライアッシュ IV 種（密度 2.24g/cm^3 、比表面積 $3860\text{cm}^2/\text{g}$ ）、砕石 2005（表乾密度 2.87g/cm^3 、吸水率 0.71%）を用い、表-1 に示す配合で作製した。供試体形状を図

表-1 コンクリートおよびモルタルの示方配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							備考		
			W	B	FA	S	G	高性能AE減水剤	AE減水剤	AE助剤		
シリーズ1	50	-	251	101	402	1509	-	-	-	-	目標強度 10N/mm^2 , S/C=3 目標強度 50N/mm^2	
	33	44	170	508	-	758	1080	2.792	-	-		
シリーズ2	43.6	59.3	225	516	-	976	670	-	1.290	-	Gmax=15mm	
シリーズ3	40	44	170	425	-	736	1049	-	0.850	1.328	-	
	55	47	170	309	-	837	1043	-	0.618	0.966	-	

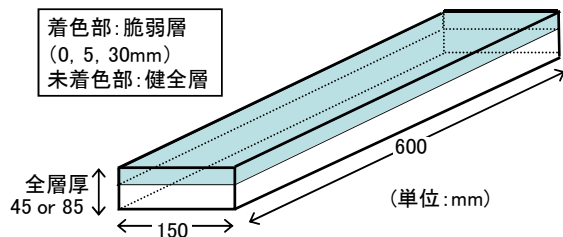


図-5 供試体形状寸法 (シリーズ 1)

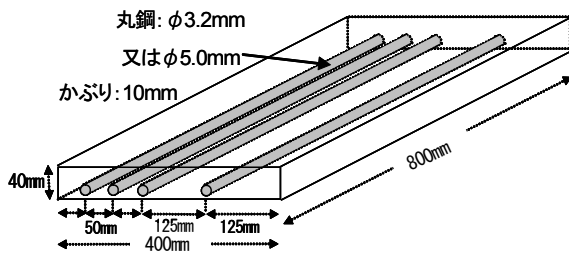


図-6 供試体形状寸法 (シリーズ 2)

図-5 に示す。コンクリート二次製品の養生を模擬するため蒸気養生(2 時間で 65℃まで上昇, 4 時間 65℃保持, 2 時間で常温まで降下)後, 脱型, 気中養生(温度 20℃, 湿度 60%)し, 材齢 7 日で試験に供した。

3.3 シリーズ 2: 鉄筋が超音波伝播速度に及ぼす影響

表面法で超音波伝播速度を計測する際, コンクリート表面と平行に鋼材があれば, ある振動子間隔以上では超音波伝播速度は鋼材の影響を受ける⁵⁾。鋼材が超音波伝播速度に及ぼす影響を検討するため, 鉄筋を配筋したコンクリート平板を作製した。使用材料は普通ポルトランドセメント, 海砂, 砕石とし, 配合条件を表-1 に, 供試体形状寸法を図-6 に示す。なお, シリーズ 2 では下水管渠の配合を模擬するため, 粗骨材最大寸法を 15mm とした。そのためペーストが多い配合となっている。

3.4 シリーズ 3: コンクリートの含水状態が超音波伝播速度に及ぼす影響

実環境下にある下水管渠は, 湿潤状態にある。コンクリートの含水状態が超音波伝播速度に及ぼす影響を明らかにするため, 材齢 2 年の W/C=40%, 55%円柱供試体(φ

7.5×15cm)を用い, 検討を行った。配合を表-1 に示す。供試体は表乾, 気乾, 絶乾状態とした。気乾状態は温度 20℃, 湿度 60%で 25 日間保管したもの, 絶乾状態は温度 20℃, 湿度 60%で 2 日間→50℃で 6 日→105℃で 11 日間乾燥させたものとした。

4. 実験結果および考察

4.1 シリーズ 1: 二層構造が超音波伝播経路に及ぼす影響

二層構造供試体における振動子間隔と伝播時間との関係(走時曲線)を図-7 に示す。ここで, 凡例の記号は, 「脆弱層厚さ-健全層厚さ」を示す。また, ◇は全て健全層, ■は脆弱層 5mm, ●は脆弱層厚さ 30mm の供試体の走時曲線を示す。図より, 脆弱層 5mm, 30mm の供試体では, 振動子間隔が 25~150mm の箇所で直線が屈折している。この原因を以下に述べる。

図-8 に示すような伝播経路 ABCD と AE を比較する。表面から深さ h に媒質密度の異なる超音波伝播速度境界層があるとすると。脆弱層および健全層の超音波伝播速度をそれぞれ V_1, V_2 , 振動子間隔を x , 走時曲線が屈折する振動子間隔を x_0 とする。 $x < x_0$ では経路 AE をとり, 脆弱層のみ経由し伝播時間は $T_1 = x/V_1$ と表せる。しかし, $x > x_0$ では健全層を経由する経路 ABCD の屈折波が観測される。この経路 ABCD の屈折波走時を T_2 とする。 i_c は屈折の臨界角である。スネルの法則を用い, (3)式を得る⁶⁾。

$$T_2 = 2 \frac{h \cos i_c}{V_1} + 2 \frac{\overline{BC}}{V_2} + \frac{\overline{BC}}{V_2} = \frac{x}{V_2} + \frac{2h\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2} \quad (3)$$

すなわち式(3)で表わされる走時曲線の, 傾きの逆数が超音波伝播速度となる。

式(3)に材料の超音波伝播速度 V_1, V_2 を代入し, 本実験で設定した脆弱層厚さ h を代入し, 屈折点が現れる時間を $T_1 = T_2$ として式を連立させることにより, 屈折点が現れる振動子間隔を算出した結果, 脆弱層厚さが 5mm では $x_0 = 20\text{mm}$, 脆弱層厚さが 30mm では $x_0 = 120\text{mm}$ となり, それぞれ実験結果とほぼ一致した。

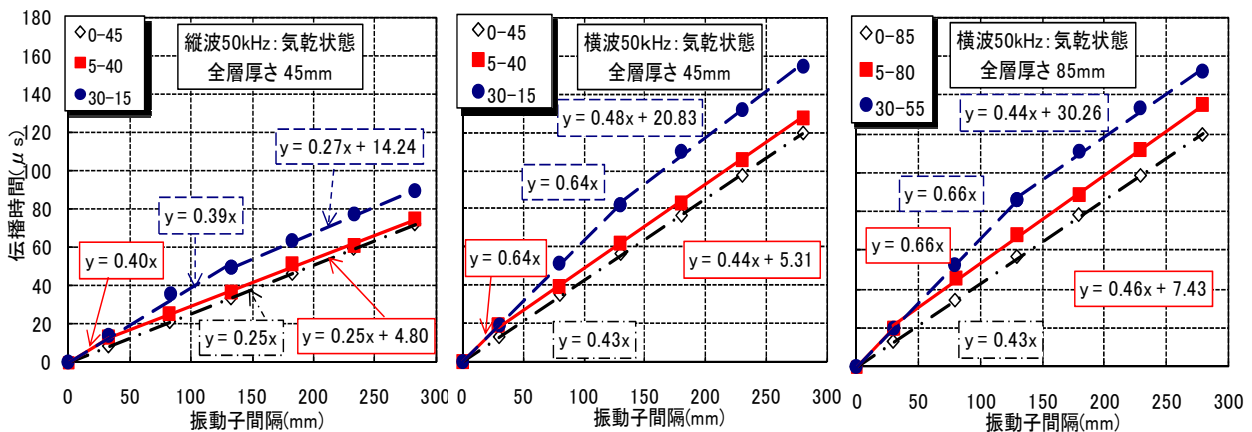


図-7 振動子間隔と超音波伝播時間の関係 (シリーズ 1)

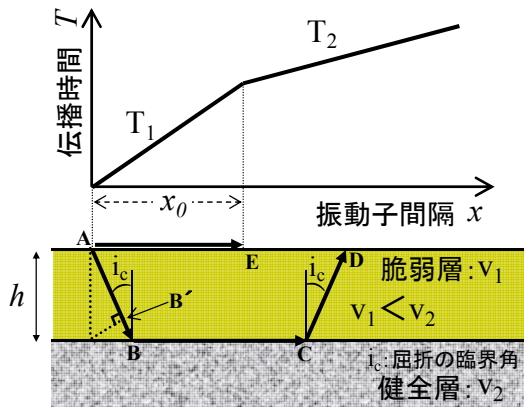


図-8 二層構造供試体中の超音波の伝播経路 (シリーズ 1)

表-2 超音波より推定した二層構造供試体の脆弱層厚さ (シリーズ 1)

使用振動子	記号	脆弱層(mm)	健全層(mm)	推定脆弱層厚さ(mm)
縦50kHz	5-40	5	40	4.8
	30-15	30	15	25.6
横50kHz	5-40	5	40	4.3
	30-15	30	15	22.7
	5-80	5	80	4.2
	30-55	30	55	26.8

以上の結果より、二層構造の場合、振動子間隔が x_0 以上では、図-8 に示す経路 ABCD の伝播経路を取ることが確認された。この伝播経路では、計測される伝播時間は脆弱層の厚さの影響を受けるが、健全層の厚さの影響は受けない。また、縦波、横波ともに、二層構造の伝播経路において、同様の傾向が得られた。さらに式(3)を h について整理すると、式(4)が得られ、走時曲線から脆弱層厚さを算出することができる。

$$h = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (4)$$

式(4)から算出した脆弱層厚さの推定値と実際の脆弱層厚さを表-2 に示す。実際の脆弱層厚さと超音波伝播時間から推定した脆弱層厚さはほぼ一致しており、超音波により脆弱層の厚さを推定できると考えられる。

4.2 シリーズ 2 : 埋設された鉄筋が超音波伝播経路に及ぼす影響

鋼材を埋設した供試体における振動子間隔と伝播時間との関係を図-9 に示す。図中の \blacklozenge は無筋供試体の場合の走時曲線を示し、 \triangle は $\phi 3.2\text{mm}$ の鉄筋直上で超音波を測定した時の走時曲線を、破線は鉄筋に直接超音波を入力した時の伝播時間を示す。この図より、鉄筋直上で計測した超音波伝播時間には、二層構造供試体と同様の屈折点が観測された。またその傾きは、屈折前までは無筋供試体と同じで、屈折後は鉄筋に直接超音波を入力したときの走時曲線の傾きと同じであった。式(3)を用いてコンクリート中の超音波伝播速度と鋼材中の超音波伝播速度から計算した結果、屈折点は約 140mm となり実験結果と一致する。

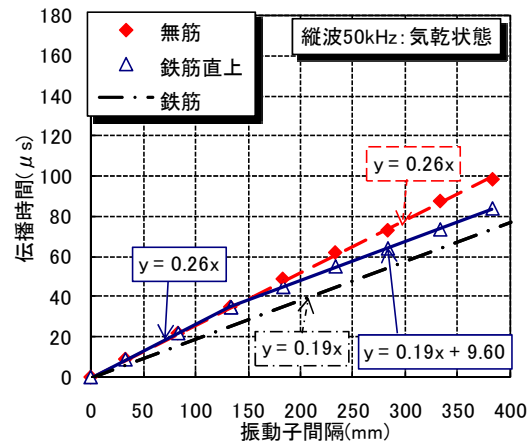


図-9 振動子間隔と伝播時間の関係 (シリーズ 2)

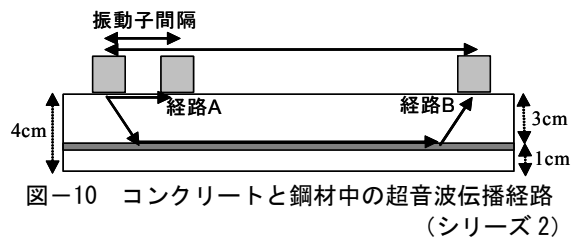


図-10 コンクリートと鋼材中の超音波伝播経路 (シリーズ 2)

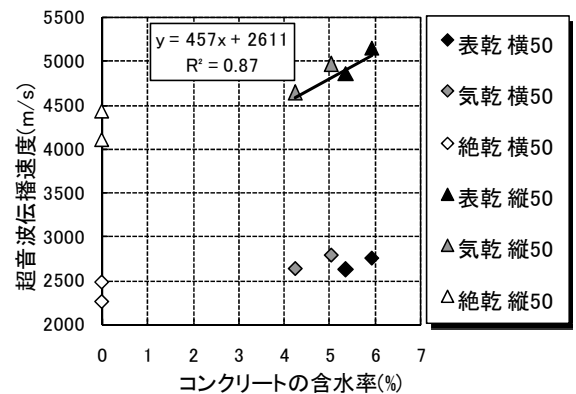


図-11 コンクリートの含水率と超音波伝播速度の関係 (シリーズ 3)

ここで、この実験結果より推定される超音波伝播経路を図-10 に示す。表面法で鋼材と平行に超音波を測定すると、二層構造供試体の伝播経路と同様に捉えることができ、振動子間隔が短い場合はコンクリート中を伝播する経路 A が観測され、振動子間隔が長くなると臨界角でコンクリート中の鉄筋に進入し、伝播時間が最も短くなる経路 B を通る波が観測されることができると考えることができる⁷⁾。

4.3 シリーズ 3 : コンクリートの含水状態と超音波伝播速度の関係

コンクリートの含水率と超音波伝播速度の関係を図-11 に示す。なお、コンクリートの含水率はコンクリートの絶乾質量に対する含水量の質量比とした。横波では、含水状態による差は見られなかった。縦波は含水率が大きいほど超音波伝播速度も大きいことが分かる。ここで、縦波も横波も絶乾状態の超音波伝播速度が表乾・気乾に比べ小さな値となったのは、乾燥中に供試体内に微細な

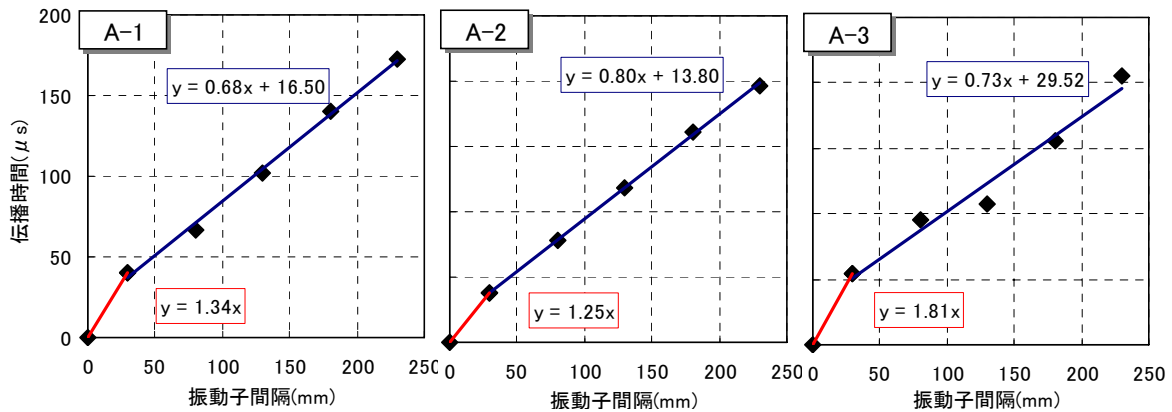


図-12 管上部内側における振動子間隔と伝播時間の関係（劣化した下水管渠管 A-1～3 の走時曲線）

表-3 調査対象下水管渠一覧

試験体名	測定箇所	試験項目
A-1～3	上部 境界部 下部	・中性化深さ ・ピッカース硬さ ・超音波伝播速度
B-1～10	管内側において周 方向5cm毎に測定	・中性化深さ ・超音波伝播速度

ひび割れが生じ、見かけ上、超音波伝播速度が遅くなった結果と考えられる。以上より、横波の超音波伝播速度は含水の影響を受けないが、縦波では含水の影響を補正する必要があると考えられる。

5. 劣化深さ推定手法の実構造物への適用に関する検討

5.1 実構造物による実験概要

4. で得られた知見を実構造物へ適用するため、実環境下で使用された鉄筋コンクリート下水管渠の劣化深さの推定について検討した。使用した下水管渠を表-3 に示す。これらは K 市において 38 年間供用され、経年劣化した下水管渠である。なお、これらの下水管渠には鉄筋の露出は認められなかった。また、供用中の下水管渠の含水状態の把握は困難であるため、以降は含水状態の影響を受けにくい横波で検討を行った。鋼材を伝わる超音波伝播経路は 4.2 で述べた通りであるが、予備実験により横波 50kHz での鋼材の超音波伝播速度は 3100m/s であるのに対し、コンクリート中の超音波伝播速度は 2400m/s と、鋼材を伝わる超音波伝播速度の方が早いことを事前に確認した。よって、振動子間隔が、鋼材の影響を受けた走時曲線の屈折点以上の場合、鋼材を伝わる波が第一波として観測されると考えられる。以上のことから、4.2 で得た結果を適用し、第二波を用いて劣化した下水管渠の劣化深さの推定を行った。

5.2 走時曲線を用いた下水管渠の劣化深さの推定

4. で提案した手法を用い、試験体 A-1～3 に対し走時曲線を作成した。この健全層と脆弱層の超音波伝播速度 V_1 、 V_2 を求め、その値を式(4)に代入し、劣化深さ h を推定した。図-12 に走時曲線を、表-4 に超音波による劣化深さの推定値と、中性化深さ・ピッカース劣化深さを

表-4 走時曲線による下水管渠の劣化深さの推定値（横波 50kHz）

供試体記号	A-1	A-2	A-3
劣化層の速度 V_1 (m/s)	744	800	552
健全層の速度 V_2 (m/s)	1479	1247	1379
中性化深さ(mm)	5.92	5.67	7.40
ピッカース劣化深さ(mm)	6.35	6.78	8.44
劣化深さの推定値 h (mm)	7.11	7.20	8.90

示す。この超音波による劣化深さの推定では、中性化深さとは誤差 2mm 以内で、ピッカース劣化深さとは誤差 1mm 以内で推定可能であった。

5.3 劣化深さ推定手法の簡素化に関する検討

5.2 で示す推定法では、1 試験体に対し複数回超音波測定を行う必要がある。現場での実用性を考慮したとき、診断に要する工程を簡素化する必要がある。そこで、4. で明らかとなった超音波伝播経路を考慮した上で、簡便な劣化深さの推定方法について、以下の通り検討した。

測定手法の簡素化のため振動子間隔を固定し、その振動子間隔に対する見かけの表面法超音波伝播速度 $V=L/T$ を算出し、 V の大小でコンクリートの劣化状態の評価を行うこととした。

次に固定する振動子間隔について検討する。まず、図-8 中の経路 ABCD をとる振動子間隔 x_0 以上でなければ劣化状態を反映しない。また、超音波測定面は脆弱化しており、さらに表面法を用いるため超音波の減衰が特に大きい。図-13 に振動子間隔を変化させたときの、測定回数 50 回時における超音波伝播速度の変動係数を示す。図より、振動子間隔を大きくすれば変動係数も大きくなっている。以上を考慮し、本実験では適切な振動子間距離 (=L) を 200mm とした。なお、超音波伝播経路は図-8 の経路 ABCD となるため、健全部コンクリートの厚さの影響を受けない。そのため、下水管渠の呼び径が異なり、管厚が変化しても劣化深さは推定可能である。

実環境下における下水管渠のコンクリートは区間により強度が異なる可能性があるため、この要因を取り除く必要がある。下水管渠下部は通常水中にあり、嫌気性条

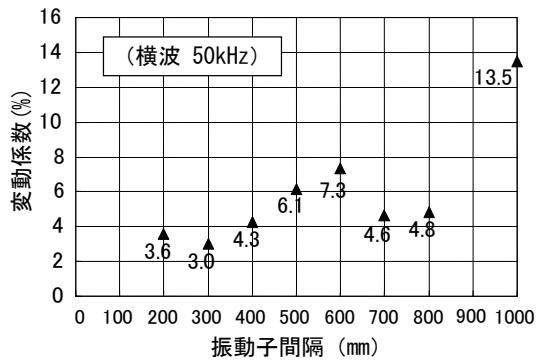


図-13 振動子間隔ごとの変動係数（測定回数 50 回）

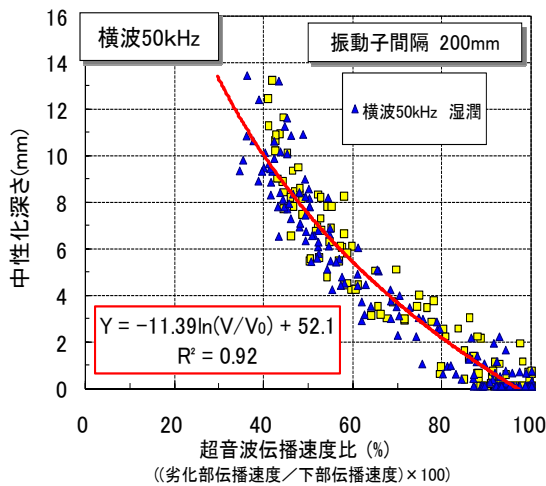


図-14 超音波伝播速度比と中性化深さの関係

件下で劣化を受けにくい²⁾。なお、下部は流水によるすりへり作用を受けるが、材料自体の化学的な変質はない。よって、劣化部の超音波伝播速度 V を下水管渠下部の超音波伝播速度 V_0 で除した「超音波伝播速度比 V/V_0 」を導入した。

図-14 に、試験体 A-1~3 および B-1~10 の下水管渠を対象とした、中性化深さと V/V_0 の関係を示す。ここで、凡例中の気乾状態とは常温の室内で 3 週間静置し、質量変化がほぼ終了した状態を示し、湿潤状態は 1 週間水中浸漬し、吸水による質量変化がほぼ終了した状態を示す。なお、既往の研究¹⁾により、硫酸劣化による中性化深さとピッカース劣化深さは、同程度であることが確認されている。図より、中性化深さが大きいほど V/V_0 が小さく、両者は相関が高いことが分かる。また、中性化深さは式(5)で表す回帰曲線により、 Y で表わすことができる。

$$Y = -11.39 \cdot \ln(V/V_0) + 52.1 \quad (5)$$

ただし、式(5)は中性化深さ 14mm 以下の条件で成立する。また、本実験では、式(5)は中性化深さの誤差 ± 3 mm 以内に包含されており、実用的に使用できる誤差範囲内である。よって、劣化層の深さがかぶりに達する以前では、劣化部の超音波伝播速度 V と管渠下部の超音波伝播速度 V_0 を計測し、速度比 V/V_0 を求めることで、回帰式(5)より間接的に中性化深さを求めることが可能であると考

える。

6. まとめ

本研究では、硫酸劣化を受けた下水管渠のコンクリート中を伝播する超音波伝播特性を明らかにし、下水管渠の硫酸による劣化深さの推定法について検討した。本研究の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 下水管渠の硫酸劣化を模擬した、脆弱層と健全層の二層からなるモデル供試体を作製し、超音波を用いて脆弱層厚さを推定することができた。また、振動子間隔 x_0 以上の場合、超音波の伝播経路は、二層構造における健全層厚さの影響を受けない。
- (2) 鋼材を伝播する超音波伝播経路は、二層構造供試体の伝播経路と同様の考え方で、その経路を説明することができた。
- (3) 縦波の超音波伝播速度は含水の影響を受けるが、横波は含水の影響を受けにくいことを、含水率の異なる供試体を用いた実験により確認した。
- (4) 劣化した下水管渠を対象に、超音波による劣化深さの評価を行った。劣化した下水管渠では、第二波の立ち上がり時間を用いて評価した。任意の下水管渠で劣化深さの評価を行うため、劣化部の超音波伝播速度 V を下部の超音波伝播速度 V_0 で除した「超音波伝播速度比 V/V_0 」を導入し、中性化深さの予測式を提案し、中性化深さを評価できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 山本大介ほか：硫酸により劣化した下水管の簡易的劣化診断手法の検討，土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集，pp.1183-1184，2005
- 2) 三品文雄：さらに詳しい腐食対策講座，環境新聞社，pp.11-14，2003
- 3) 物理探査学会：物理探査ハンドブック，pp.118-122，1998
- 4) 魚本健人ほか：超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定における探触子の影響，第 54 回セメント技術大会講演要旨，pp.160-161，2000
- 5) 尼崎省二：コンクリートの弾性波速度に及ぼす鋼材の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1491-1496，2002
- 6) 物理探査学会：物理探査ハンドブック，pp.18-19，1998
- 7) 尼崎省二ほか：コンクリートの弾性波速度に及ぼす鉄筋の影響および表面法による弾性波速度の測定，コンクリート工学論文集，Vol.18，No.2，pp.95-102，2007