

## 下水道施設におけるコンクリートの劣化層推定に関する研究

日大生産工 (院) ○亀田 瞬 日大生産工 保坂 成司

### 1. はじめに

下水道施設とは、汚水や雨水を下水道で収集し処理場で浄化したのち、公共用水域へ放流する施設であり、衛生的な日常生活を送る上で必要不可欠な施設である。

平成 21 年度末における日本全国の下水道の普及率は 72.7%であり、東京 23 区では 99.9%、横浜市は 99.8%、大阪市はほぼ 100% などとなっており、日本の主要都市における下水道の整備はほぼ終了している。

下水道は自然流下方式で道路の下地中深くに埋設されていることが多く、このため長期耐久性を有するコンクリートなどを材料とした下水道管が広く採用されている。しかし、近年コンクリート下水道管の早期老朽化が問題となっており、この老朽化による陥没事故が東京都で年間約 1400 件も報告されている。

この早期老朽化の原因は近年の調査で微生物が生成する硫酸によるコンクリート腐食であることがわかっており、最悪の場合十数年で機能しなくなる報告もある。

東京都ではこの早期老朽化の対策として補修、再構築の箇所を抽出すべく頻りに調査を行っている。この調査において管径 800mm 以下の下水道では管内調査カメラの映像による目視調査であるため内部評価など構造物の健全性に関わる調査を行えないのが実状である。

本研究では供用中である構造物に損傷を与えることなく内部調査が行える非破壊検査の一つである超音波法を用い、腐食による劣化層の推定が可能であるか検討を行った。

### 2. 超音波法について

超音波法は人間が聞き取ることの出来ない音域の音波を用いて、調査対象物内部の様子を調査する試験方法であり、調査対象物を傷つけることなく破損や欠陥を調べることがで

きる試験法である。

この超音波を用いた測定法には反射法や透過法、表面走査法などがある。反射法は一つのトランスデューサーで送受信を行うため、内部空洞などの欠陥を調査する方法に向いているが、物質表面の劣化層などの調査には向いていない。よって、本研究では送受信のトランスデューサーを別々に用いた二探法である透過法と表面走査法による研究を行った。

#### a) 透過法

透過法とは、試験体の片面に送信用トランスデューサーを、対応する面に受信用トランスデューサーをそれぞれ設置し、超音波の送信・受信を行い伝播時間の測定する方法である。この透過法は伝播時間から密度などの測定が可能であり測定精度も高いが、トランスデューサーで構造物を挟み込まなければならないため、下水道管の様に片側から調査を行う場合には適用が困難である (図-1.a)。

#### b) 表面走査法

表面走査法とは、同一表面上に送信及び受信のトランスデューサーを設置し、超音波の送信・受信を行い、伝播時間を測定する方法である。この試験方法は超音波が伝播する経路が複数考えられることや、指向性の低い超音波であると超音波が分散し計測が難しくなるなどの欠点もあるが、供試体の片面のみで測定ができるため、供用中であるコンクリート管での測定も可能である。(図-1.b)

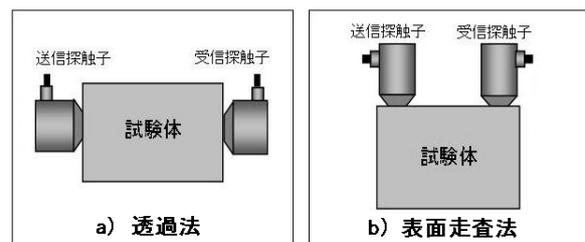


図-1 透過法および表面走査法の概略図

### 3. 実験方法

#### 3-1 試験体について

微生物による腐食を受けたコンクリートの主成分は二水石膏であることが分析によりわかっている。このことから本研究では、コンクリート平板を用いて表面に劣化層に見立てた石膏層を作成したものを試験体とし実験を行った。試験体の大きさについては、過去の実験より狭小な試験体では内部反射の影響により解析が困難であったことから、内部反射の影響が少ない 300mm×300mm×50mm のコンクリート平板の表面に 5mm, 10mm, 15mm, 20mm の厚さで石膏層を作成した (図-2)。

なお、石膏は水溶性が高く下水道と同じ環境下である水中で実験を行うと、短期間で石膏が溶解・剥離してしまうため、石膏に水溶性アクリルペイントを約 6% 混和させ耐水性を向上させた。

#### 3-2 実験装置について

本研究で用いた超音波の実験装置は「パルサーレーザー」「トランスデューサー」「オシロスコープ」で構成されている (図-3)。

パルサーレーザーは超音波を励起させるための電気パルスが発生させる装置である。

トランスデューサーはパルサーレーザーから受け取った電気パルスを超音波へ、またその逆の相互変換を行う装置である。

オシロスコープは電気信号を波形として表す装置であり、受信波形の分析・解析に使用した。

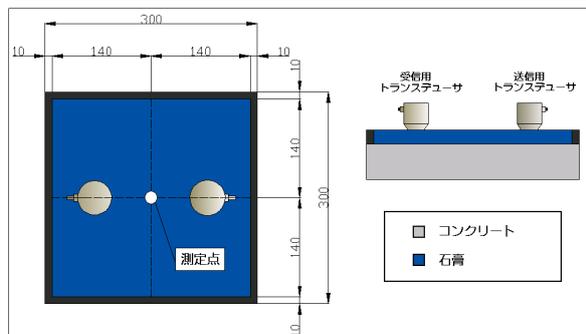


図-2 供試体の平面図及び断面図

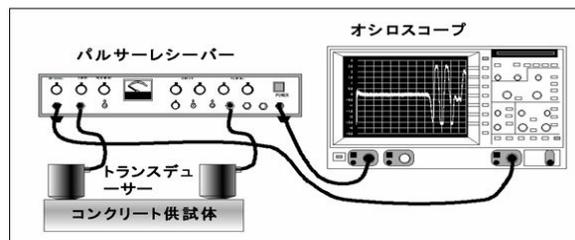


図-3 測定装置図

#### 3-3 測定条件

通常、気中における測定ではトランスデューサーと試験体を密着させるためにカップラントとしてグリセリンを使用している。しかし本研究では供用中の下水道管における測定を目的としていることから、水中に試験体を静置し測定を行った。この水中における測定では、水がカップラントの役割を果たすためグリセリンは不要となる。また超音波は温度の影響を受けるため室温を 25℃ に保った実験室内で測定を行い、実験で使用する水は水槽に汲み置きし水温を一定にしたものを使用した。

#### 3-4 計算方法について

超音波発生装置によって物質に超音波を伝播させた場合、超音波が物質を通過するまでに要する時間は次の式で表される。

$$T = \frac{L}{V} \quad \dots \textcircled{1}$$

T…伝播時間 (s)

L…伝播距離 (m)

V…伝播速度 (m/s)

今回使用する試験体はコンクリートと石膏の複合体であり、コンクリートと石膏では密度が違うため、超音波の伝播速度に違いが生ずる。よって今回の伝播時間の計算は次の式を用いた。

$$T = \frac{L_G}{V_G} + \frac{L_C}{V_C} \quad \dots \textcircled{2}$$

$L_G$ …石膏における伝播距離 (m)

$L_C$ …コンクリートにおける伝播距離 (m)

$V_G$ …石膏における伝播速度 (m/s)

$V_C$ …コンクリートにおける伝播速度 (m/s)

T…伝播時間 (s)

### 3-5 伝播速度の測定

今回の研究の目的はコンクリート表面の劣化層の推定である。劣化層の厚さが未知であるとき、先に示した②式より劣化層の厚さを求めるためにはコンクリートと石膏の伝播速度をあらかじめ測定する必要がある。よって、1MHzの周波数のトランスデューサーを用い透過法により測定を行った結果、コンクリート伝播速度は4098m/s≒4100 m/s、石膏伝播速度は1923m/s≒1900 m/sであった。

### 3-6 表面走査法によるコンクリート伝播経路の推定

過去の実験で、超音波が供試体を伝播する経路として石膏を透過したのち、コンクリート表面を伝播する経路が有力であることがわかっている。この伝播経路の模式図を図-4に示す。

しかし、図では伝播経路を、超音波の送受信がトランスデューサーの中心から中心に伝播している様に示したが、実際トランスデューサーの直径は1MHzで30mm(100kHzでは50mm)あるためトランスデューサーのどの位置から超音波の送受信が行われているか不明であり、石膏厚を推定するためには正確なコンクリートの伝播経路を求める必要がある。

よって、実測伝播時間より式②を用いて既値である石膏伝播距離、石膏伝播速度、コンクリート伝播速度、伝播時間を用いてコンクリート伝播距離の計算を行った結果を次の表-1に示す。また、グラフの横軸にトランスデューサー中心間隔、縦軸にコンクリート伝播距離の平均を表したものが図-5である。

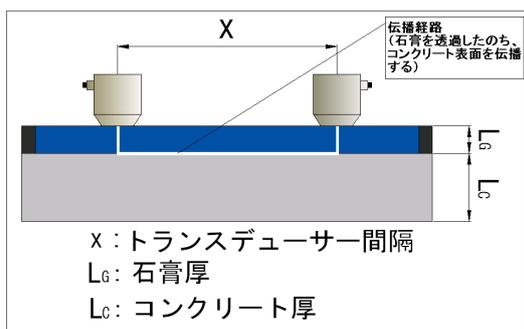


図-4 伝播経路模式図

表-1 コンクリート伝播距離の計測結果

石膏厚	トランスデューサー中心間隔	100mm	110mm	120mm	130mm	140mm	150mm	160mm
5mm	実測伝播時間(μs)	25	27	30	33	35	37	39
	コンクリート伝播距離(mm)	80.1	89.9	102.2	112.9	121.1	130.1	138.3
10mm	実測伝播時間(μs)	35	37	39	42	44	46	48
	コンクリート伝播距離(mm)	98.7	107.7	117.6	127.4	136.4	146.3	153.6
15mm	実測伝播時間(μs)	35	38	42	44	46	49	51
	コンクリート伝播距離(mm)	80.4	90.2	108.3	117.3	125.5	135.3	144.4
20mm	実測伝播時間(μs)	40	41	45	48	50	52	55
	コンクリート伝播距離(mm)	76.0	83.4	97.4	109.7	117.9	127.7	137.5
コンクリート伝播距離平均(mm)		83.8	92.8	106.4	116.8	125.2	134.9	143.5

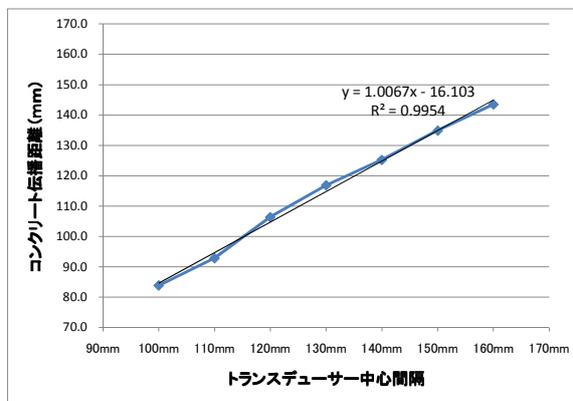


図-5 トランスデューサー間隔とコンクリート伝播距離

ここで、グラフよりトランスデューサーの中心間隔が広がると伝播距離も長くなり、一次的な変化が生じることがわかった。この近似直線式を表すと次の通りとなる。

$$L'_C = 1.0067x - 16.103 \quad \dots \textcircled{3}$$

$L'_C$ : 推定コンクリート伝播距離 (mm)  
 $x$ : トランスデューサー中心間隔 (mm)

この式の傾きはほぼ1でありトランスデューサー間隔と推定コンクリート伝播距離の変化量とほぼ一致する。切片はトランスデューサー間隔と推定コンクリート伝播距離との誤差であり、この誤差がトランスデューサーにおける超音波の送信・受信の位置の違いであると考えられる。

次にここで求めた式③を式①の  $L_c$  に代入すると石膏厚予測式は次の式となる。

$$L_G = \frac{(T \times V_C - L'_C) V_G}{V_C} \quad \dots \textcircled{4}$$

ここで表面走査法による測定値を推定式に代入し検証を行った。この検証結果を表-2に示す。

④式を用いた推定石膏厚は表-2の右から2列目に示す値であり、石膏層の作成誤差を考慮しても誤差は僅かであり推定は可能であると言える。

表－2 石膏厚の推定結果

実石膏厚 (mm)	伝播時間 (μs)	推定石膏厚 (mm)	誤差 (mm)
5	39.0	4	-1
10	48.0	12	2
15	51.0	15	±0
20	54.6	19	-1

3-7 トランスデューサー周波数の違いによる石膏厚の推定

続いてトランスデューサーの周波数を 50 k Hz, 100 k Hz, 500 k Hz の場合も推測が可能であるか検討を行った。この検討の結果を図－7 a)～c)に示す。

グラフより各トランスデューサーと推定コンクリート伝播距離の関係を示す式は次の通りである。

- 50 k Hz :  $y = 0.9709x + 4.1026$
- 100 k Hz :  $y = 1.0066x + 13.923$
- 500 k Hz :  $y = 1.0184x + 20.639$

トランスデューサーの周波数の違いにより傾きに違いは現れなかったが、切片に違いが現れた。この切片の違いは現在のところトランスデューサーの直径がトランスデューサーの周波数により異なること、また低周波になるほど波長が長くなるため、波の打ち消しなどの現象が生じた可能性もある。

5. まとめ

超音波法を用いた表面走査法によりコンクリート表面に作成した石膏層の厚さの推定を行った結果、以下の式で表わされた。

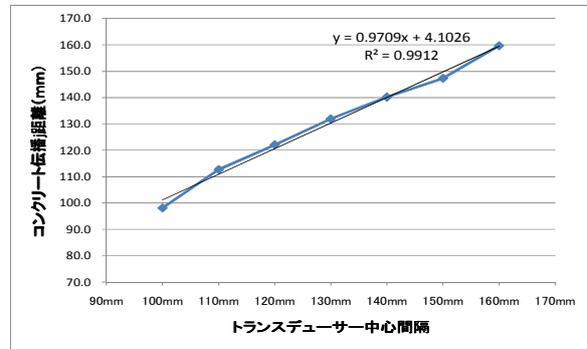
$$L_G = \frac{(T \times V_C - L'_C)V_G}{V_C}$$

- $L_G$ …石膏における伝播距離 (m)
- $L'_C$ …推定コンクリート伝播距離 (m)
- $V_G$ …石膏における伝播速度 (m/s)
- $V_C$ …コンクリートにおける伝播速度 (m/s)
- $T$ …伝播時間 (s)

この式よりコンクリート伝播速度と石膏伝播速度と超音波伝播時間の3つが測定可能であれば石膏厚の推定が可能であることが明示された。

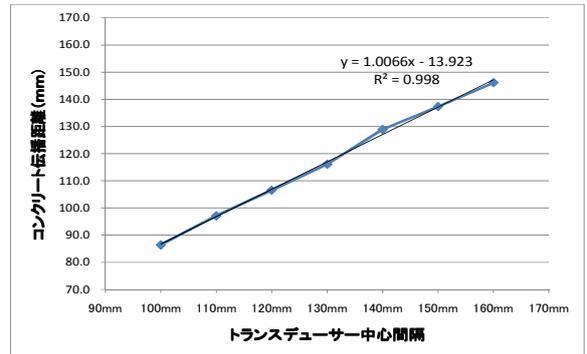
a) 50 k Hz

石膏厚	トランスデューサー中心間隔	100mm	110mm	120mm	130mm	140mm	150mm	160mm
5mm	実測伝播時間(μs)	35	36	38	40	41	42	57
	コンクリート伝播距離(mm)	122.7	127.7	133.4	142.4	146.5	149.8	213.8
10mm	実測伝播時間(μs)	35	39	42	44	46	49	53
	コンクリート伝播距離(mm)	102.0	116.7	128.2	138.1	147.1	157.7	173.3
15mm	実測伝播時間(μs)	38	41	44	47	50	52	55
	コンクリート伝播距離(mm)	92.7	105.0	115.7	128.0	141.1	150.1	159.1
20mm	実測伝播時間(μs)	39	46	48	50	52	53	57
	コンクリート伝播距離(mm)	75.2	101.5	111.3	119.5	126.1	131.8	146.6
コンクリート伝播距離平均(mm)		98.2	112.7	122.1	132.0	140.2	147.4	173.2



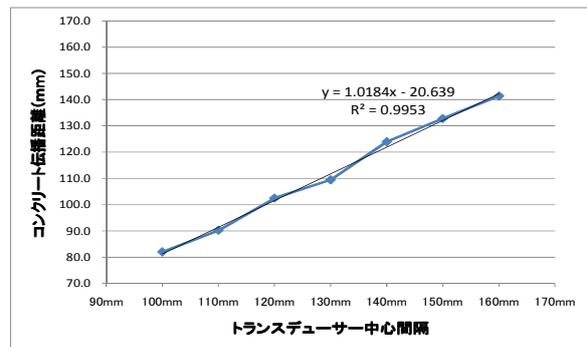
b) 100 k Hz

石膏厚	トランスデューサー中心間隔	100mm	110mm	120mm	130mm	140mm	150mm	160mm
5mm	実測伝播時間(μs)	40	29	32	36	39	41	43
	コンクリート伝播距離(mm)	143.2	97.3	111.3	124.4	138.3	145.7	156.4
10mm	実測伝播時間(μs)	38	35	38	40	43	46	48
	コンクリート伝播距離(mm)	111.8	101.2	112.6	120.0	134.8	143.8	154.5
15mm	実測伝播時間(μs)	39	42	49	43	47	49	50
	コンクリート伝播距離(mm)	95.2	107.5	134.5	110.7	126.3	134.5	141.9
20mm	実測伝播時間(μs)	40	41	44	46	49	52	53
	コンクリート伝播距離(mm)	77.7	82.6	95.7	103.9	116.2	125.2	131.8
コンクリート伝播距離平均(mm)		107.0	97.1	113.5	114.8	128.9	137.3	146.1



c) 500 k Hz

石膏厚	トランスデューサー中心間隔	100mm	110mm	120mm	130mm	140mm	150mm	160mm
5mm	実測伝播時間(μs)	26	28	31	33	36	38	40
	コンクリート伝播距離(mm)	85.0	93.2	103.9	114.5	127.7	135.9	143.2
10mm	実測伝播時間(μs)	34	36	38	44	43	45	48
	コンクリート伝播距離(mm)	97.9	106.1	114.3	138.1	133.1	143.0	152.5
15mm	実測伝播時間(μs)	35	37	39	43	45	47	49
	コンクリート伝播距離(mm)	79.6	88.1	96.8	109.9	120.6	128.8	137.8
20mm	実測伝播時間(μs)	37	39	44	46	49	51	53
	コンクリート伝播距離(mm)	65.4	75.2	94.9	103.9	114.6	123.6	131.8
コンクリート伝播距離平均(mm)		82.0	90.2	102.5	116.6	124.0	132.8	141.4



図－7 伝播距離計算結果