

微破壊式手法による下水管渠の劣化診断法の開発

山本 大介¹, 濱田 秀則², 佐川 康貴³, 池田 隆徳⁴

^{1~4}九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門

概要：硫酸劣化したコンクリートは、表層の劣化した領域と、深い箇所の健全領域とに明確に区分できる。この健全厚さを超音波法により求める方法、および内視鏡カメラにより求める方法について検討した。さらに、曲げひび割れ荷重の支配要因は管頂部の健全厚さであり、この厚さより曲げひび割れ荷重を推定できることを示し、これにより劣化診断手法を確立できることを示した。

1. はじめに

高度経済成長期を境に、都市部を中心に多くの下水道管路が整備されてきた。平成21年度には、わが国の下水道管路総延長は40万kmを超えているとされており、下水道普及率（下水道利用人口/総人口）も71.1%とされている¹⁾。一般に下水道管路の耐用年数は50年とされているが、図1に示すように、2020年代を境に既設の下水道管路の多くがその耐用年数50年を迎えようとしている²⁾。そのため、近い将来には膨大な下水道管路ストックが一斉に寿命を迎えることが予測されている。近年の自治体の厳しい財政状況を鑑み、この下水道管路の大量の更新時期の到来により、下水道事業に関する財政は破綻するとの警鐘が鳴らされている。

また、下水道管路で使用されるコンクリート製下水管渠には、その特有の環境による硫酸劣化が多く見られる。下水中の微生物の活動により硫酸が生成され、コンクリートが硫酸劣化を起こす³⁾。このため下水道管渠が損傷し、下水の漏出や道路陥没等を起こし、社会問題となっている。この硫酸劣化により、耐用年数50年を満たさない下水道管渠が早期に重大な劣化を起こす事例が多数報告されている。そのため早期に補修・補強を必要とするケースが多数見受けられ、維持管理コストが高騰し、上述の下水道事業の財政圧迫を加速させる一因となっている。

下水道事業の財政破綻を回避するためにも、下水道管路のライフサイクルコストを抑えることが必須となる。そのためには補修・更新時期を適切に見極め、予防保全的な維持管理を行うことがますます重要になってくる。しかしながら、現状の診断技術では下水道管渠の内側からのビデオカメラ観測などが主流であり、下水道管渠の構造物としての曲げひび割れ荷重の評価を基にした下水管渠の健全度判定を適切に行うことは困難である。そのため、下水道管渠の適切な劣化診断を行う技術開発が急

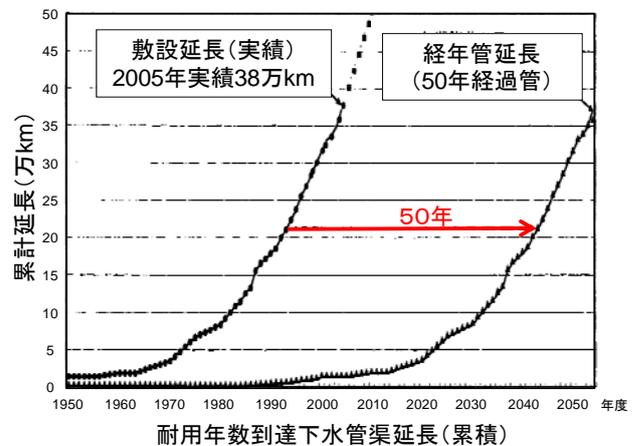


図1 耐用年数到達下水管渠延長²⁾

務であると考えられる。

2. 研究の背景

著者らは、既往の研究において、38年間供用された下水道管渠の調査⁴⁾を行っている。既往の研究における試験項目と試験体記号を表1に示す。また、この中で下水道管渠を、常に下水に接する下部、下水位の上下で乾湿の影響を受ける境界部、通常下水と接しない上部と、3つの部位に分類している。

この調査では、試験体A-4~A-8、補修管1および補修管2について曲げ試験を行った。ここで、補修管とはFRP内面補修を施している下水道管渠である。曲げ試験結果を図2に示す。これらの試験の実施により、以下のことが明らかとなった。

下水道管渠の境界部および上部の管内側表面では細孔量が増大し、Ca量が減少していた。また、下水道管渠の軸方向垂直断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧したところ、劣化した領域は中性化が確認された。さらに、ビッカース硬さ試験を行ったところ、劣化した領域のビ

表1 既往の研究における劣化下水道管渠調査の試験項目⁴⁾

試験項目	試験体記号									
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	補修管1	補修管2
曲げ試験	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○
ビッカース硬さ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中性化深さ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
配合推定	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
シュミットハンマー	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-
細孔径分布	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-
X線分析顕微鏡	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-

ッカース硬さは著しく低下していた。これらの現象は、下水道管渠の劣化部の内側表面付近で見られるが、それより深い領域のコンクリートは健全であった。

また、ビッカース硬さの変化は急激であり、ある深さで劣化部と健全部を明確に区分できた。ここで、管内側表面からビッカース硬さの急変する位置までの深さを、ビッカース劣化深さと定義した。なお、供用時は常時下水に接していたと推測される管下部では、これらの劣化現象は全く見られなかった。

本論文では、これら試験結果の関係性を整理し、コンクリート製下水道管渠の曲げひび割れ荷重の低下要因について検討する。その上で、曲げひび割れ荷重に基づくコンクリート製下水道管渠の劣化診断方法について考察することを目的とする。

3. 下水道管渠の劣化深さに関する考察

3.1 超音波伝播速度測定

既往の研究⁴⁾では、水銀圧入法による細孔径分布測定で、劣化部のコンクリートはポーラス化していることを示した。これより、超音波伝播速度も低下していることが予測される。ここで超音波に着目した理由は、非開削・非破壊で診断することを前提としており、コストを抑える為すでに普及している非破壊試験の中では、超音波法が最も適する。

本実験では埋設中の下水道管渠にも適用可能な表面法を用いて下水道管渠の内側から超音波の計測を行った。表面法とは試験体の同一面に2つの振動子を当て、伝播速度を計測する方法である。また、コンクリートの超音波測定に適する周波数は50~100kHzである。本実験では50kHzの縦波および横波超音波を採用した。計測の際、オシロスコープで波を観察すると、波形は図3のようになり、途中から波形が明確に変化していた。

既往の研究⁵⁾より、鉄筋コンクリートの超音波伝播経路は鉄筋の影響を受けることが確認されている。鉄筋中を伝わる超音波はコンクリート中を伝わる超音波より速いため、鉄筋中を伝わる超音波が先に振動子に到達するた

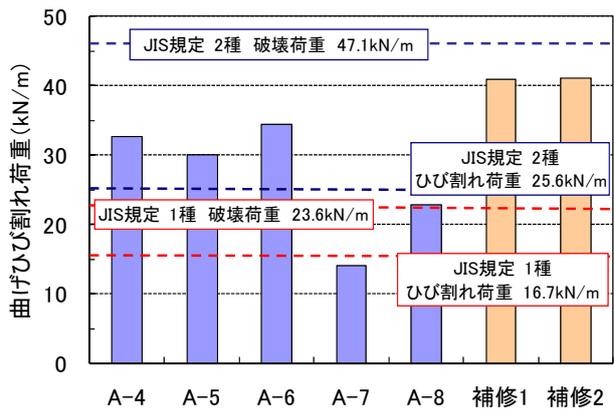


図2 曲げ試験結果⁴⁾

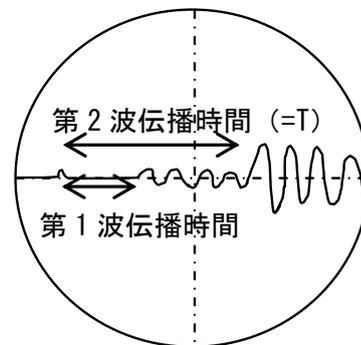


図3 オシロスコープを用いた第2波超音波伝播時間

めである。そこで、鉄筋の影響を除くため、コンクリート中を伝わる波(第2波)の到達時間(=T)を読取った(図3参照)。

このようにして得られた第2波の超音波伝播速度を、縦波横波それぞれ図4、図5に示す。図より縦波・横波ともに、コンクリートの劣化が見られる上部および境界部で超音波伝播速度の低下が見られた。

この場合の超音波伝播経路については、著者らによる既往の研究でモデル供試体を用いた実験により明らかにされている⁶⁾。ここで、脆弱コンクリートの下層に健全コンクリートがある場合を想定する(図6参照)。脆弱コン

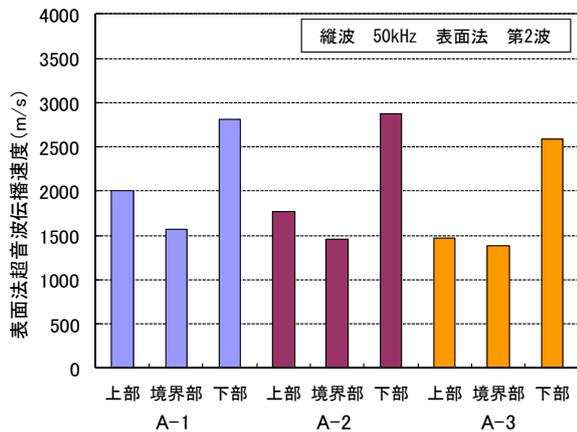


図4 表面法による超音波伝播速度(縦波)

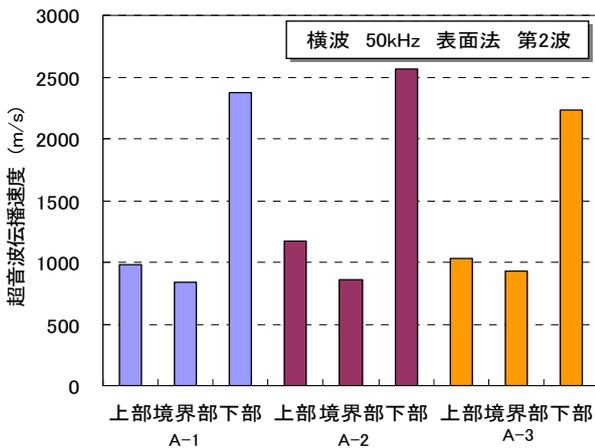


図5 表面法による超音波伝播速度(横波)

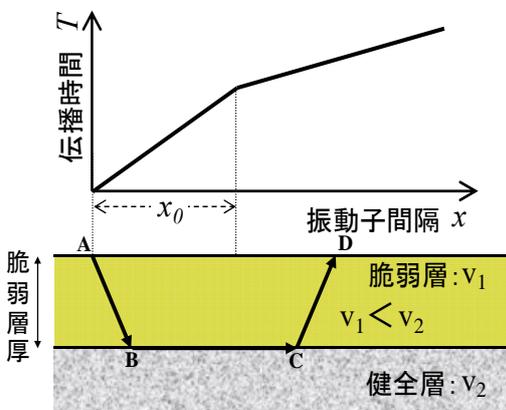


図6 脆弱・健全層からなる媒質中を伝わる波の経路

軸、伝播時間をy軸で表した時の、屈曲点が現れる振動子間隔(x_0)以上の振動子間隔を取った場合、超音波伝播経路は経路ABCDになり、脆弱層が厚くなるほど超音波伝播速度も低下することをモデル供試体実験により確認している。そのため、下水道管渠に対し内側より超音波表面法を適用した場合の第1波、第2波は図7のような伝播経路を取ると推測される。

また、供用中の下水道管渠は湿潤状態である場合が多いと推測される。横波は縦波に比べ乾湿の影響による測定誤差を受けにくい。そのため、含水の影響を受けやすい下水道管渠の計測では横波が適すると考える。しかしながら、横波専用のカップリング剤はせん断応力が伝達するように製造されるため粘性が高く、取扱いが縦波カップリング剤に比べ難しいことに注意が必要である。

3.2 各試験結果の関係性に関する考察

既往の研究による結果⁴⁾では、下水道管渠の好気性領域である上部および境界部で劣化が進行し、嫌気性域である下部では劣化は進行しないことが確認されている。また、劣化部では脆弱層を残しながら劣化が進行していることが観察された。これは希硫酸環境下で硫酸劣化が生じたもの⁷⁾であると推測される。

また、コンクリートの強度は細孔径量と関係があるとされ、特に骨材とセメントペーストとの境界である遷移帯に多く存在する細孔径 $50\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ の空隙の累積細孔量が大きく関与すると言われる⁸⁾。既往の調査⁴⁾で各部位の $50\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ 細孔量と、同領域でのビッカース硬さを調べた結果、図8のような関係が得られた。図より、劣化部内側のビッカース硬さが小さい領域のコンクリート組織は、ポーラス化していることがわかる。

また、既往の調査⁴⁾によるX線分析顕微鏡画像での管内側から、Ca分布量の少ない、Caが溶脱したと思われる厚さを『Ca溶脱深さ』と定義した。試験体A-1、A-4の下水道管渠内面から計測した中性化深さとCa溶脱深さの関係から(図9参照)、これら2つには正の相関が認められた。よって、X線分析顕微鏡で観察された劣化部の

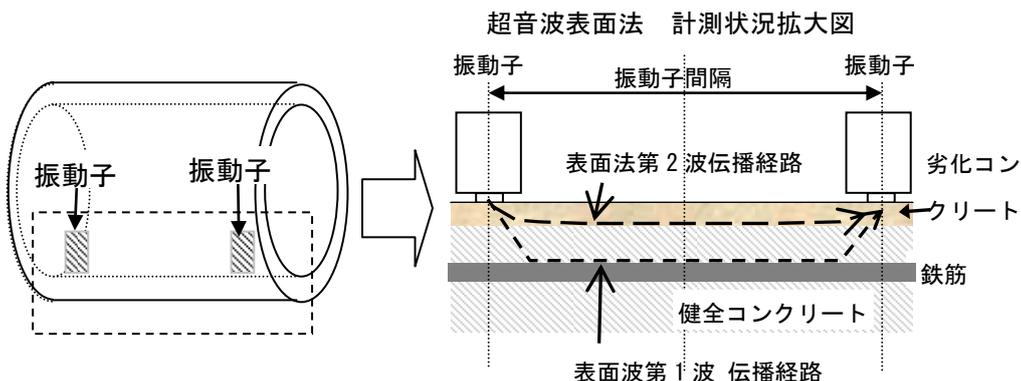


図7 超音波伝播速度の測定概念図(表面法)

クリート面からの表面法超音波計測では、振動子間隔をx

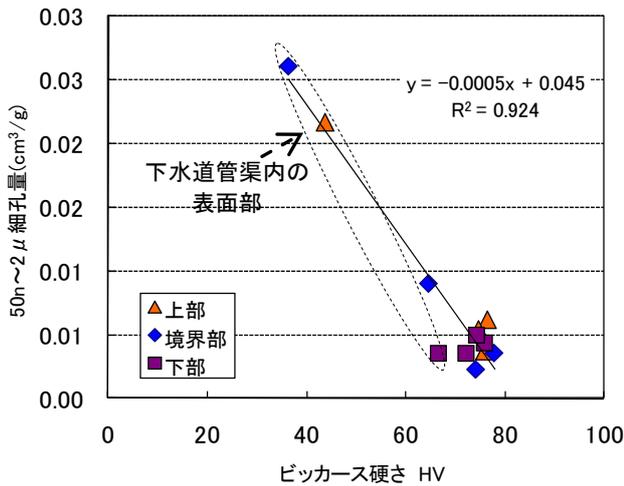


図8 試験体A-2におけるビッカース硬さと50nm~2μm細孔量との関係

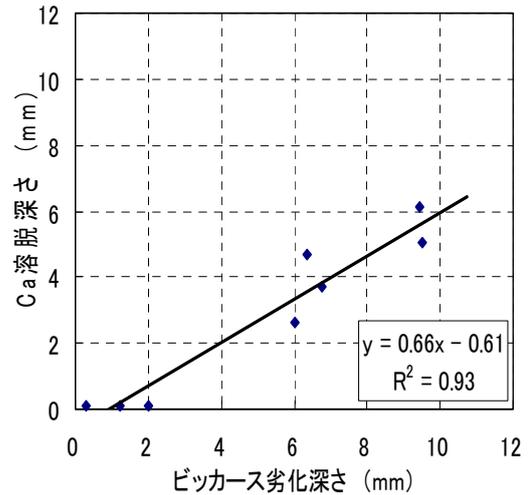


図10 ビッカース劣化深さとCa溶脱深さの関係

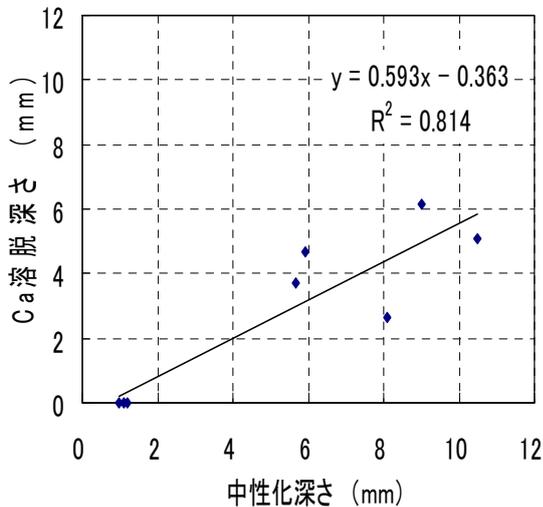


図9 中性化深さとCa溶脱深さの関係

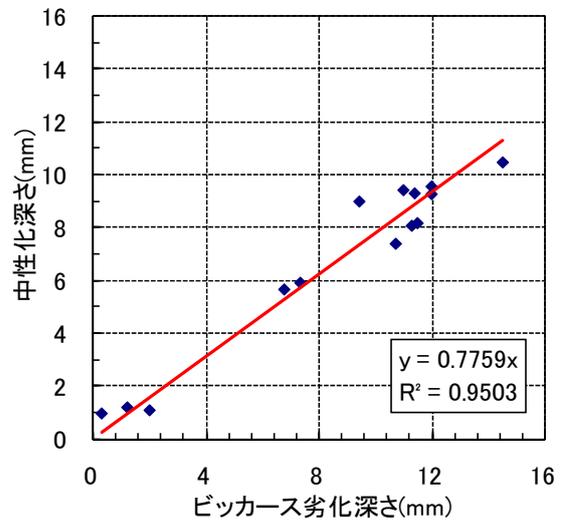


図11 ビッカース劣化深さと中性化深さの関係

Ca溶脱は、コンクリート中のC-S-H構造が、硫酸により炭酸カルシウムに分解され石膏化し、Caイオンが溶脱した結果、アルカリ性を失い中性化したものと推測される。次に、図10に試験体A-1、A-4から計測したビッカース劣化深さとCa溶脱深さ、図11に試験体A-1~A-8から計測したビッカース劣化深さと中性化深さの関係を示す。図より3つの間には相関関係が認められる。また、特に図11からビッカース劣化深さと中性化深さは良い相関関係にあると言える。

3.3 超音波法による下水道管渠の中性化深さの推定法

ここでは、硫酸劣化を受けたコンクリートの劣化深さを、非破壊試験方法の1つである超音波法を用いて推定することを検討する。表面法横波超音波伝播速度とビッカース劣化深さの関係を図12に、同じく中性化深さとの関係を図13に示す。これらの図より、ビッカース劣化深さと中性化深さは表面法超音波と相関関係があることが

わかる。

ここで、著者らによる既往の研究⁹⁾より、超音波伝播速度から中性化深さを推定する方法を以下に示す。実環境下における下水道管渠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。下水道管渠下部は通常水中にあり、嫌気性条件下で劣化を受けにくい³⁾。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、強度の相違の影響を除くため、劣化部の超音波伝播速度 V を下水道管渠下部の超音波伝播速度 V_0 で除す「超音波伝播速度比 V/V_0 」を導入した。図14に、試験体A-1~A-8の下水道管渠の試験結果による中性化深さ Y と V/V_0 の関係を示す。また、中性化深さは式(1)で表す回帰曲線から、 Y で表わすことができる。

$$Y = -11.39 \cdot \ln(V/V_0) + 52.1 \quad (1)$$

よって、超音波伝播速度から、式(1)により中性化深さを推定できることが示された。本手法による中性化深さ

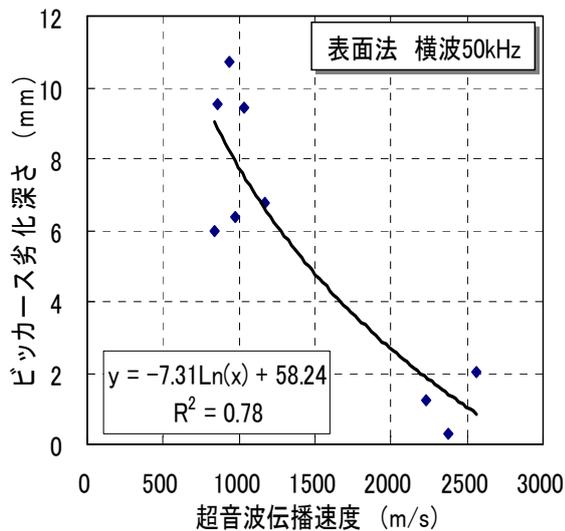


図12 超音波伝播速度とピッカース劣化深さの関係 (表面法横波)

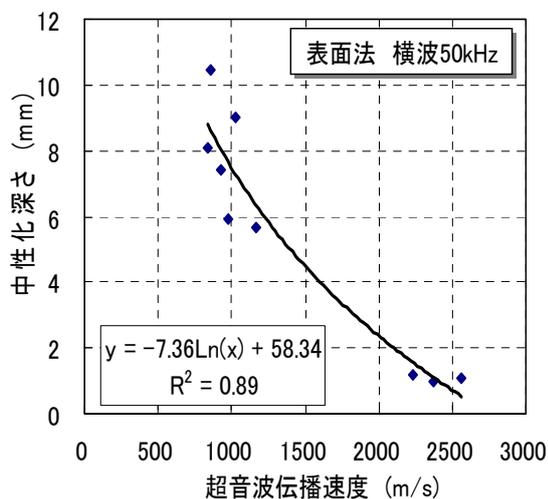


図13 超音波伝播速度と中性化深さの関係 (表面法横波)

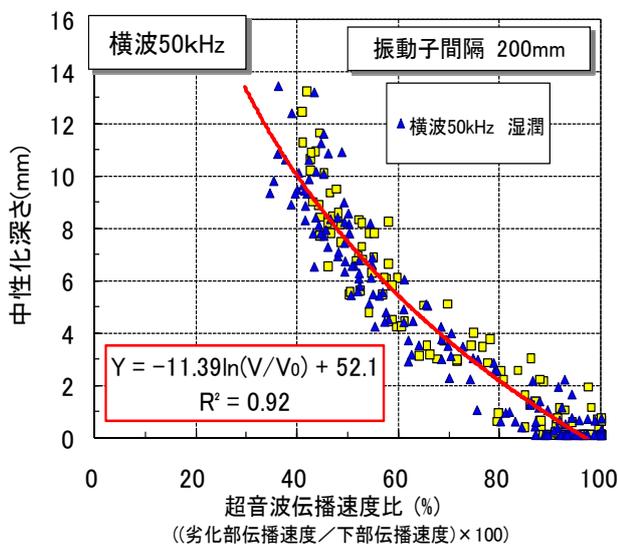


図14 超音波伝播速度比と中性化深さの関係

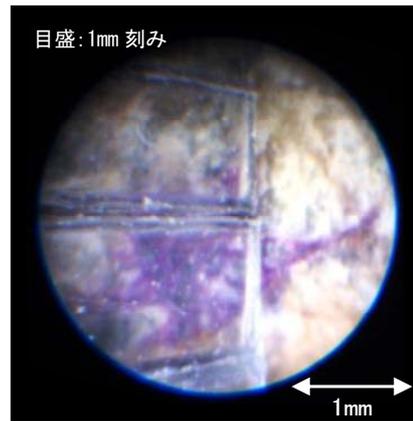


図15 内視鏡カメラを用いた中性化深さ計測状況

の推定誤差は±3mm以内であり、実用的に使用できる誤差範囲であった。

一般に、下水道管渠におけるコンクリートの硫酸劣化は、二水石膏、エトリンガイト等を生成し、それらが多水和物であるため膨張し、コンクリート組織が膨張破壊するとされている。

本実験による下水道管渠の中性化した領域では、ピッカース硬さの低下が確認され、また同領域でCaも溶脱し、そのCaの溶脱したところにSの存在が確認されており、また同領域で細孔量が増大していることが明らかとなった。これらの試験結果から考察すると、中性化の原因は大気中の二酸化炭素が作用する炭酸化によるものではなく、硫酸による劣化でセメント組織が石膏化し、セメント組織のpHが低下したことによるものと推測される。

3.4 内視鏡カメラを用いた中性化深さの計測方法

前節では非破壊による超音波法を用いた非破壊による中性化深さの推定について考察を行った。ここでは、非開削で、より直接的に中性化深さを計測するもう一つの方法として、小径のドリル掘削孔にフェノールフタレイン溶液を直接噴霧し、ドリル掘削孔の側壁を工業用内視鏡カメラを用いて直接観察する方法について検討した。使用した内視鏡カメラはMORITEX製BS-2.4であり、レンズの先端はφ2.4mmであり、通常はエンジン内部の観察などに使用されている。これにデジタルカメラを装着し、ドリル掘削孔の側面を撮影した。

内視鏡カメラによる中性化深さ測定手順を示す。まず、鉄筋探査機により、鉄筋の位置を推定する。推定した鉄筋位置と重ならない部位から、ドリル穿孔する位置を決める。次に、下水道管渠の内側よりダイヤモンドドリルを用いて、φ5mmの孔を穿孔する。穿孔する深さは下水道管渠を貫通しない程度とする。穿孔後は、コンクリートの粉末が残るため、コンプレッサーにより圧縮空気を吹きかけ粉末を十分に除去する。その後、フェノールフ

タレイン溶液をドリル掘削孔中に噴霧する。このとき、噴霧量が多すぎると、未中性化部で呈色した赤紫色液が中性化領域に垂れ、中性化深さを判定することが困難となるため、フェノールフタレイン溶液噴霧量は必要最小限とするよう注意が必要である。フェノールフタレイン溶液が乾燥した後、予めスケールを装着した内視鏡カメラを掘削孔に挿入する。その後、下水道管渠内側表面からの中性化深さを計測する。計測の終了後に、液だれを防ぐため粘性を高くした断面補修材を塗り込む。

この方法により得られた、下水道管渠の掘削孔断面写真を図15に、また、コンクリートカッターで下水道管渠を切断し、切断面にフェノールフタレインを吹きかけた時の中性化深さと、内視鏡カメラを用いて測定した中性化深さととの相関図を図16に示す。この図より、内視鏡カメラを用いた中性化深さ測定値と、コンクリートを切断し、その断面よりノギスを用いて計測した中性化深さ測定値は一対一の関係にあることがわかる。

以上の結果から、内視鏡カメラを用いることにより、中性化深さを高精度で測定できることが示された。よって、非破壊で中性化深さを推定するには、超音波法を用いて推定する方法を、また正確に中性化深さを求めるには、5mmのドリル穿孔を伴うが、内視鏡カメラを用いて求める方法を適用することが可能である。

4. 管頂部劣化深さをを用いた曲げひび割れ荷重の推定方法に関する検討

これまでの結果より、下水道管渠は硫酸劣化により石膏化に伴う中性化を起こしており、その中性化領域のコンクリート組織はポーラス化し脆弱化していた。下水道管渠内側表面の劣化領域は、ビッカース硬さの急激な低下を伴っており、健全な領域と劣化領域に明確に分けられた。下水道管渠の曲げひび割れ荷重を考えると、その主たる支配要因はコンクリートの健全な厚さと考えることができる。石膏化により脆弱となった部位は十分に外力を受け持つことができず、結果としてコンクリート厚さが減少したものとみなすことができる。これ

に着目し、劣化深さと下水道管渠の曲げひび割れ荷重について考察する。

曲げ荷重時に最も大きなモーメントが加わる箇所は、管頂部と管底部である。そのうち管頂部は劣化により健全な厚さが減少することがこれまでの結果で明らかになっており、構造的に弱点部になる。実際の曲げ荷重時も管頂部からひび割れが発生し、続いて管底部にひび割れが発生するという破壊形態を示した。そのため、管頂部の曲げモーメントに着目し、図17中の管頂部にかかる力を局所的に考え、劣化深さと曲げひび割れ荷重の関係について考察する。

円環（半径 r 、曲げ剛性 EI ）を集中荷重 P により荷重するとき、管頂部にかかる曲げモーメント M は次のように表せる。

$$M_{\text{管頂}} = \frac{P \cdot r}{\pi} = 0.318P \cdot r \quad (2)$$

よって、下水道管渠を単位幅の円環と考えた場合、管頂には $0.318P \cdot r$ の曲げモーメントが加わる⁹⁾。次に、図18に示すような管頂部の微小領域に着目した時、コンクリートの引張応力 f_t 、断面二次モーメント I 、また重心の距離 y は、

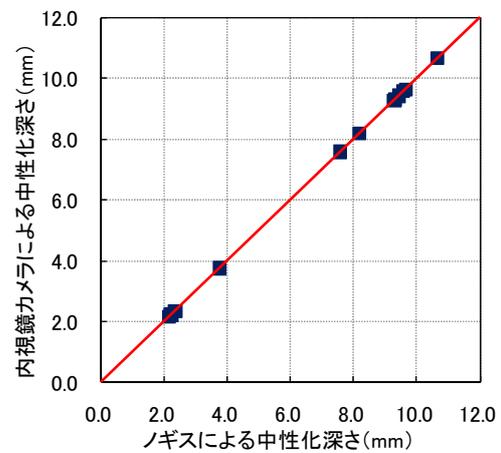


図16 切断面による中性化深さノギス計測結果と内視鏡カメラによる中性化深さ計測結果の相関図

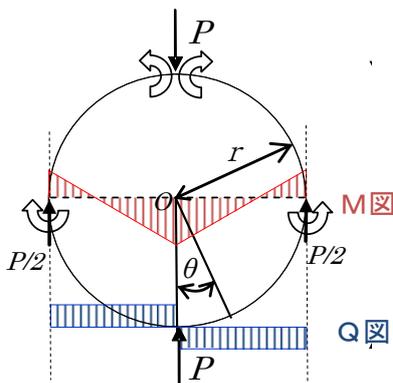


図17 円環の曲げ荷重模式図

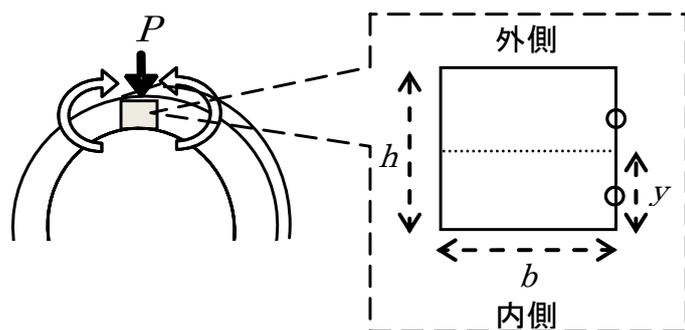


図18 下水道管渠の管頂部微小領域における長方形断面

表2 曲げ試験に供した試験体の諸物性値

	曲げひび割れ発生 曲げ荷重(kN/m)	管厚 (mm)	中性化深さ (mm)	(健全全部厚さ) ² (mm ²)
A-4	32.67	29.87	9.31	422.71
A-5	30.00	29.22	8.18	442.68
A-6	64.37	31.99	9.57	502.66
A-7	14.10	25.91	9.28	276.56
A-8	22.87	27.29	9.43	318.98
補修1	40.83	32.13	10.66	460.96
補修2	41.10	28.56	9.64	396.81

※健全全部厚さ＝管厚-中性化深さ

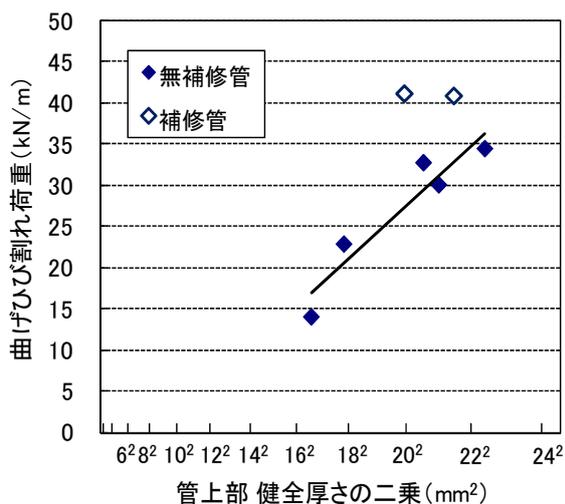


図19 無補修管と補修管の管頂部の健全厚さの二乗と曲げひび割れ荷重

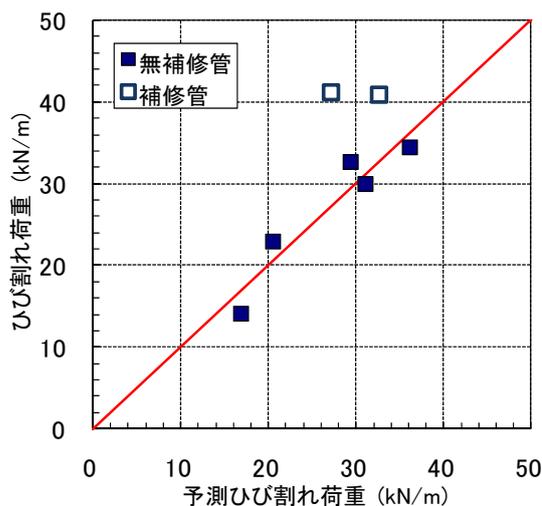


図20 中性化深さをを用いた予測ひび割れ荷重とひび割れ荷重の関係

$$f_t = \frac{M}{I} y \quad (3)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4)$$

$$y = \frac{1}{2} h \quad (5)$$

と表せる。式(2)に代入すると、曲げひび割れが生じる荷重 P は、式(6)のように表せる。

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

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(6)より、下水道管渠の呼び径が等しく(すなわち半径が同じで)、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強度 F_t と管の管厚 h の二乗で決定されることになる。

経年劣化した下水道管渠は、気相部のコンクリートが硫酸により石膏化し、劣化部は著しく脆弱化する。しかし、劣化部においても劣化深さより深い部位ではピッカース硬さも低下せず、中性化や Ca の溶脱も確認されず、

健全であった。よって、下水道管渠に見られる硫酸劣化では、ある深さまでのコンクリートは脆弱化し、それより深いコンクリートは十分に健全である。

ここで、試験体 A-1～A-8、補修管 1 及び補修管 2 について、劣化深さを中性化深さとし、『管頂部の健全全部厚さ＝管厚－劣化深さ』として、健全管厚さの二乗と曲げひび割れ荷重の関係を試算した。その計算で用いた下水道管渠の諸物性値を表 2 に示し、計算結果を図 19 に示す。図より、A-4～A8 は健全管厚の二乗と曲げひび割れ荷重の間に相関が見られる。また FRP 内面補修を施した下水道管渠は補強効果が認められ、補修によって 1.14～1.95 倍に曲げ強度が増加している。また、中性化深さから予測したひび割れ荷重と、曲げ試験によるひび割れ荷重との関係を図 20 に示す。図より、補修管の場合は予測値よりもひび割れ荷重が大きい結果となっているが、無補修管の場合はひび割れ荷重の予測値と実測値がほぼ一対一の関係にあることが確認された。

以上のことから、無補修管では式(6)で示すように、管頂部の健全全部厚さを知ることができれば、下水道管渠の曲げひび割れ荷重を予測することが可能である。本論文では、中性化深さは超音波法もしくは内視鏡カメラを用

いて計測する手法を示した。これらの手法により中性化深さを求め、管頂部の健全厚さの二乗を算出することで、既設下水道管渠の曲げひび割れ荷重を非開削で推定できる可能性があることが示唆された。

5. まとめ

- (1) 下水道管渠の硫酸劣化による、コンクリート表面のビッカース硬さが急激な低下を起している劣化深さをビッカース劣化深さとするとき、このビッカース劣化深さと中性化深さは良い相関関係にあった。
- (2) 非開削による、コンクリート製下水道管渠の中性化深さの測定について、超音波法を用いた場合の推定法を示すとともに、内視鏡カメラを用いた測定法も示した。
- (3) 曲げひび割れ荷重は、管頂部の健全厚さの二乗に比例することを導き、実環境で劣化した下水道管渠の曲げ試験により、これを検証した。その結果、中性化深さより曲げひび割れ荷重を推定できる可能性が示唆された。よって、本論文で示した超音波法および内視鏡カメラを用いた中性化深さ測定手法により、非開削で既設下水道管渠の曲げひび割れ荷重を推定できる可能性があることが示唆された。

【謝辞】本研究の遂行にあたり、内視鏡カメラを用いたコンクリートの中性化深さ計測において、佐賀大学 伊藤幸広准教授にご協力を頂いた。ここに謝意を記す。

本報告内容は、(社)日本下水道協会の発刊する下水道協会誌に投稿予定である。

【参考文献】

- 1) 下水道協会ホームページ
- 2) 下水道管路施設 維持管理マニュアル 2007, 日本下水道管路管理業協会, pp.177-183, 2007
- 3) C.D.Parker. The Corrosion of Concrete -2. The Function of Thiobacillus Concretivorus (Nov. Spec) in the Corrosion of Concrete Exposed to Atmospheres Containing sulfide-, Austral. J. Exp. Biol., No.23, pp.91-98, 1945
- 4) 山本大介ら：長年月供用されたコンクリート製下水道管渠の詳細な劣化調査, 下水道協会論文集投稿中, 2010
- 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) 山本大介ら：超音波法による硫酸劣化深さの推定手法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1491-1496, 2009
- 7) 蔵重勲：硫酸によるコンクリート劣化のメカニズムと予測手法, 東京大学学位論文, 2002
- 8) 羽原俊祐：硬化コンクリートの組織及び空隙構造と物性の関係に関する研究, 慶応大学大学院学位論文, p150, 1992
- 9) 構造力学公式集, 土木学会, pp.407-411, 1974