

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760350

研究課題名(和文)性能劣化に基づくコンクリート製下水道管渠の維持管理システムの構築に関する研究

研究課題名(英文) Study on the development of maintenance management system of concrete sewerage pipes based on the performance of degradation

研究代表者

山本 大介 (YAMAMOTO, Daisuke)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・その他

研究者番号：40398095

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：下水道施設の老朽化が進み、コンクリート製下水道施設では予定供用期間50年より早期で劣化する事例が多数報告され、重大な問題となっている。しかし、従来の点検手法では下水管のコンクリート内部の変状を確認することが難しく、下水管の余寿命を明確に示すことは困難である。

本研究では、長期間供用された下水管に対して実施した劣化調査を基に劣化診断の方法について検討した。その結果、管内面からのドリル穿孔を用いた内視鏡カメラ観察により、コンクリート内部の劣化状態を把握できることを利用し、これに基づいた下水管の余寿命予測の手法について提案した。さらに、コンクリート製下水管の劣化診断フローを提案した。

研究成果の概要(英文)：It has been frequently reported that concrete sewage facilities has deteriorated in short term than expected service life time of 50 years. This is serious problem in durability and maintenance of the sewage facilities. It is clear that this deterioration originates from sulfuric acid generated by the micro-organism activity in the sewage, thus nowadays a routine corrosion inspection of the sewage pipes is carried out. However, deterioration in sewage pipe has not well verified by current checking techniques, thus to ensure the required performance during service period is difficult.

In this study, the method for deterioration diagnosis for sewage pipes is investigated. As a result, the degree of deterioration can be examined, and methodology for estimation of service life with satisfies required performance of sewage pipe is proposed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：下水道管渠 維持管理 ライフサイクルコスト 硫酸劣化 性能劣化 ライフサイクルマネジメント

1. 研究開始当初の背景

予定供用期間 50 年を超過する老朽既設下水管路が 2020 年頃を境に全国的に急増する見通しである。また、下水道管渠の硫酸劣化が問題となっており、供用後早期に劣化し補修・更新すべき下水道管渠も多数報告されている。よって、今後は維持管理費用の平準化、LCC の最適化が重要となる。

昨今下水管路の腐食点検が数多く行われているが、経年劣化による下水の漏水や道路陥没等の人的・経済的被害は増加しつつあり、特に道路陥没は年間約 4400 件にものぼる。このような社会活動に重大な影響を及ぼす事故や機能停止を未然に防止するため、また下水道事業の運用コスト縮減のために、今後は予防保全的管理が重要となる。

現在は TV カメラを搭載したロボットによる管内視覚調査や目視調査による管路点検が主流である。しかし、従来の調査法ではコンクリート内部の劣化状態を把握することは困難である。それ故、下水道管渠の残存曲げ耐力評価が出来ない。従来の劣化調査では劣化状態の区分化が行われるが、目視判定に基づくため、残存性能に即した判定を行うのが困難な状況にある。そのため、補修方法の選定基準も曖昧なものとならざるを得なく、計画的な維持管理の実現も困難な現状にある。以上の背景から、材料劣化に基づく残存耐力評価を加味した下水管路の効率的な管理システムの構築が急務にある状況である。

2. 研究の目的

本研究課題では、下水道管渠の性能劣化曲線に基づく劣化状態のグレーディングおよび下水道管渠の要求性能を考慮した使用限界の提案を行う。また、下水道管渠の硫酸劣化は t 則に基づき、曲げひび割れ荷重を用いた余寿命算定方法も検討する。また、腐食機構の整理と管渠の環境による劣化速度の明確化と、劣化程度のグレーディングに基づく適切な補修法の提案、および管路の最適維持管理フローの構築を行う。

以上の項目を明らかにし、劣化状態に応じた適切な維持管理方法の提案を行うことで、計画的な管路の維持管理を可能とする。

3. 研究の方法

下水道管渠の診断方法の適用性について検証する。また、性能劣化曲線に基づく劣化状態のグレーディングについて検討し、劣化の将来予測についても検討する。また、管路の最適維持管理フローを構築する。ここでは管理設時から供用終了時に至るまでの、劣化状況や埋設環境、使用状況に応じた補修・補強工法を最適に選定できるような体系作りを行う。

4. 研究成果

4.1 コンクリート製下水道管渠劣化調査

硫酸劣化により下水道管渠に生じる変状

と、曲げ耐力の低下に関する基礎的データを収集するため、38 年間供用された呼び径 250 の下水道管渠の劣化調査を行った。その結果、供用中において気相部、および気相と液相の境界部であった部分では中性化が認められ、また中性化が進行した部位ではピッカース硬さの大幅な低下、細孔量の増大、Ca の溶脱が認められた。しかし、これらの劣化は管内側の表層部のみで見られ、より深い部分のコンクリートは健全であることが確認された。一方、供用中に液相であった部位では劣化は認められず、ほぼ健全なコンクリートであることが確認された。また、曲げ強度試験の結果より、曲げ耐力は管断面上部の健全な部分として残存しているコンクリート厚さの 2 乗に比例することが確認された。

ドリル穿孔による硫酸劣化深さの推定法

劣化部のコンクリートは内側表面から断面外側方向に、ある深さまで劣化しているが、それより外側の領域は健全である。この劣化深さの計測を、内視鏡カメラを用いて試みた。ここでは、ピッカース硬さが低下する深さと中性化深さがほぼ同程度との実験結果をもとに、劣化深さを中性化深さとして内視鏡カメラにて劣化深さを計測した。その結果、内視鏡カメラを用いて、ドリル穿孔部分を観察する手法で精度よく劣化深さが計測できることがわかった。以下では、管頂部劣化深さをを用いた下水道管渠の曲げ耐力の推定法、および劣化診断システムについて考察する。

4.2 外圧荷重抵抗性に関する検討

地中に埋設された下水道管渠に作用する力の大半は鉛直方向の土圧であり、管断面に作用する曲げモーメントは管頂部、管底部で最大となる。硫酸劣化機構から劣化は気相部で大きくなることを考慮すると、埋設されている下水道管渠が受ける負荷が最大となる箇所は硫酸劣化を受け易く、かつ作用する曲げモーメントが最大となる管頂付近となる。

JIS A 5372 では、下水道管渠に対するひび割れ荷重が規定されている。ひび割れ荷重とは、下水道管渠に外圧荷重が作用したとき、幅 0.05mm 以上のひび割れが発生する荷重であり、その時点でその下水道管渠は使用限界状態に達していると考えられることから、ひび割れ荷重に達した時点で継続的な供用は不可能となる可能性が高い。そこで、ひび割れ荷重に着目し、管頂部の劣化深さ、ひび割れ荷重、およびひび割れ発生時の曲げモーメントについて次のように考察した。

円形断面に集中荷重 P (kN/m) が作用する場合、管頂部の曲げモーメントは次式(1)で示される。

$$M = 0.318P \cdot r \quad (1)$$

M : 管頂部の曲げモーメント(kN・m)

r : 管厚中心までの円形断面の半径(m)

一方、ひび割れが発生する曲げモーメント M_c (kN・m/m)は次式(2)で示される。

$$M_c = \frac{f_t \cdot b \cdot (t_0 - t_f)^2}{6} \quad (2)$$

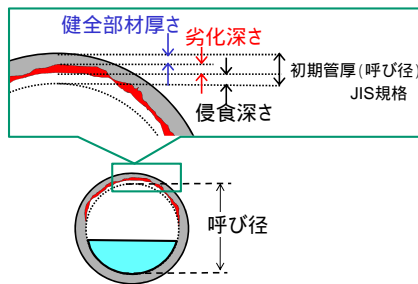


図-1 健全全部材厚さの推定方法

ここで、 f_t : コンクリート引張強度(N/mm^2)、 b : 載荷幅(m)、 t_0 : 初期管厚(m)、 t_f : 劣化深さ(m)

これより、引張強度 f_t および管頂部の劣化深さ t_f が分かれば、初期管厚 t_0 に JIS 推奨管厚を代入することで、式(2)よりひび割れが発生する曲げモーメント M_c を算出できる。よって、管頂部の劣化深さが分かれば、JIS に規定されるひび割れ荷重を基準とした外圧に対する耐力判定が可能となる。

4.3 劣化深さをを用いた耐力診断法

健全全部材厚さ推測の適応範囲

最大曲げモーメントが働く管頂部における健全全部材厚さを考える。上部の健全全部材厚さが求めれば、式(2)よりひび割れが発生する曲げモーメント M_c を算出可能である。

ここで、内視鏡カメラで劣化深さ t_f を求めることが必要となる。実構造物で見られる硫酸劣化には、脆弱化に加えて、コンクリートの侵食による消失も含まれる。したがって、真の健全全部材厚さを求めるには、初期の管厚 t_0 および劣化深さ t_f 、および侵食深さを求める必要があるが、本実験で取り扱った劣化下水道管渠の供用初期の管厚が不明なため、侵食深さは求められなかった。

ここでは、内視鏡カメラで求めた劣化深さ t_f より健全全部材厚さを推定することとした。これは、初期管厚 t_0 から劣化深さ t_f を差し引くというものである(図-1)。しかし、コンクリートの部材厚が減少するほど劣化が激しい場合(例えば粗骨材が露出する、鉄筋が露出するなど劣化が極度に進行している場合)、侵食深さが未知のため、本方法では健全全部材厚さを正しく推定することは出来ない。それ故、本方法の適用範囲を、表面からのコンクリートの侵食がない場合に限定することとした。また、後述するように粗骨材や鉄筋が露出するほど劣化が進行した場合には、既に曲げ耐力が著しく低下し使用限界状態に達していることが推測される。

上述の条件を付した上で、下水道管渠の鉛直荷重によるひび割れ発生条件、および余寿命の推定を試みた結果について示す。

下水道管渠の外圧に対する耐力判定法

曲げ強度試験結果を用いて、劣化下水道管渠のコンクリートの引張強度 f_t を算出した。図-2 に式(2)中の t_f を変数とし、劣化深さ t_f に対する M_c の値をプロットした結果を示す。また同図中に供試体(U-1, U-2, U-3, U-5)の曲げ強度試験結果による M_c と t_f の関係を

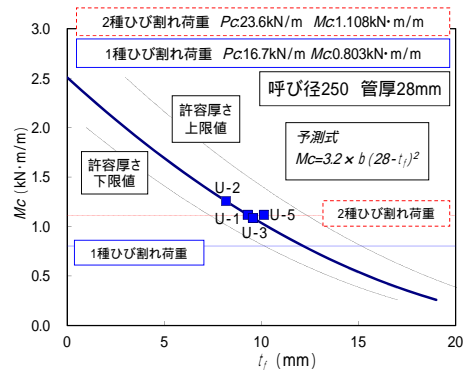


図-2 劣化深さ t_f とひび割れが発生する曲げモーメント M_c の関係

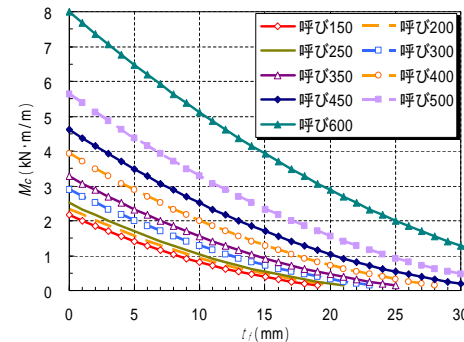


図-3 下水道管渠の種々の呼び径での t_f と M_c の関係

示す。なお、外圧強度の基準値が異なる1種ひび割れ荷重時曲げモーメント、および2種ひび割れ荷重時曲げモーメントを図中に示す。また、JIS 規定で示される呼び径 250 の管厚許容誤差 $2\text{mm} \sim +3\text{mm}$ から生じる誤差も併せて示す。図より、供試体(U-1, U-2, U-3, U-5)による結果は、いずれも M_c の計算値と一致している。よって、呼び径 250 の劣化下水道管渠の M_c を求めるには、内視鏡カメラで求めた劣化深さ t_f を式(2) に代入する方法が有効であることがわかった。

任意の呼び径へのひび割れが発生する曲げモーメント推定方法の適用

図-2 において、呼び径 250 の劣化下水道管渠を対象として、劣化深さ t_f から M_c の推定を行った。ここでは、式(2)を用いて種々の呼び径の M_c を計算する。JIS 規格の寸法を用いたときの、各呼び径の t_f と M_c の関係を計算した結果を図-3 に示す。呼び径が異なると初期管厚 t_0 を変更し、式(2)を用いて算出することになる。なお、腐食によるコンクリートの消失を伴わないことを、推定的前提条件とする。

次に、1種および2種ひび割れ荷重それぞれでひび割れ発生荷重時曲げモーメントの検討が可能であるが、ここでは1種ひび割れ荷重時曲げモーメントに着目し、外圧が下水道管渠に働き、ひび割れが発生する限界健全全部材厚さを計算し、その時の劣化深さを許容劣化深さとした。すなわち、実際の劣化深さが許容劣化深さに達したとき、下水道管渠にひび割れが発生すると想定される。表-1 に各呼び径に対する許容劣化深さの計算結果を示す。以上より、任意の呼び径の下水道管渠

表-1 各呼び径での1種ひび割れ荷重時曲げモーメントと許容劣化深さ

呼び径	1種ひび割れ荷重時 曲げモーメント(kN・m/m)	初期管厚 (mm)	限界健全全部材厚さ (mm)	許容劣化深さ (mm)
150	0.492	26	13	13
200	0.645	27	14	13
250	0.803	28	16	12
300	1.026	30	18	12
350	1.333	32	20	12
400	1.685	35	23	12
450	2.088	38	26	12
500	2.551	42	29	13

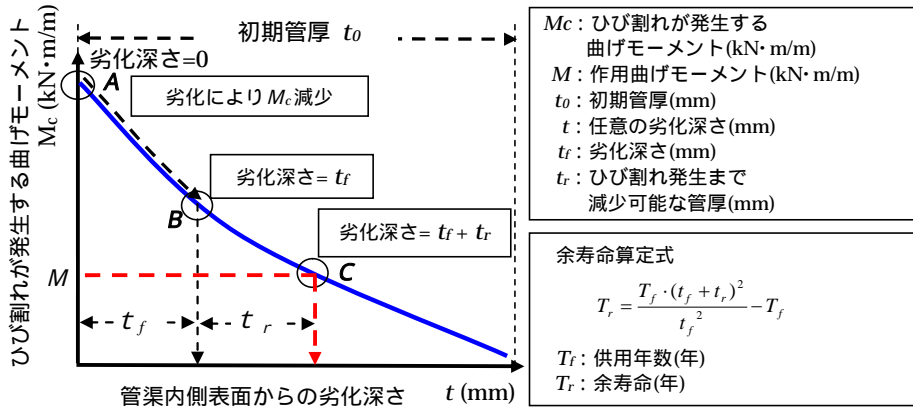


図-4 t_f から求める劣化下水道管渠の余寿命推定法の概念図

に対し、劣化深さ t_f からひび割れが発生する曲げモーメント M_c が推定されることになる。なお、JIS の管厚やひび割れ荷重値は改定により変遷しているため、長年供用されている既設管渠の建設当時の設計条件は現在の基準を満たさない可能性がある。しかし、今後も供用されることを考慮すると、これらの管渠も現行の JIS 規格を満足する必要があるため、建設時期にかかわらず現行の JIS 規格値である 1 種ひび割れ荷重によって耐力を評価することとした。

なお、侵食により粗骨材や鉄筋の露出が見られるほど劣化が進行した場合、その劣化深さは 12~13mm 以上となる。表-1 から、このような下水道管渠はすでに許容劣化深さ以上に劣化が進行していると推定される。

よって、初期管厚 t_0 および劣化深さ t_f に基づく曲げ耐力の算出により、劣化した下水道管渠に対し、JIS 規定のひび割れ発生荷重値を閾値とした残存耐力評価を行うことが可能であると分かった。

余寿命の推定

先に示した健全全部材厚さの推定では、管渠内側表面からのコンクリートの侵食がない場合に限定した。硫酸溶液中のコンクリートの劣化と時間の関係は、既往の研究でルート式、あるいは線形式が提案されている。ルート式は腐食層が脱離せず拡散律速に従う場合、また線形式は流水中などで腐食層が脱離する場合の劣化予測式である。ここではコンクリートの侵食がないと仮定し、下水道管渠の劣化進行は劣化深さが時間の平方根に比例する t 則に則るとした。これを用いて、下水道管渠の曲げ耐力が JIS の定めるひび割れ発生荷重値を下回るまでの期間を求めた。またこの残存期間を余寿命とした。

図-4 の A 点は、供用開始直後で下水道管

渠の管厚は t_0 である時点を示す。今、供用年数 T_f を経て B 点に至り、劣化深さが t_f に達したとする。この下水道管渠に JIS の定めるひび割れ発生荷重が働くときの作用曲げモーメントを M とする時、劣化深さが t_f ならば下水道管渠にひび割れは発生しないと想定される。更に供用年数を経て C 点に至ったとする。C 点の劣化深さは $t_f + t_r$ であり、このとき $M_c = M$ となり下水道管渠にひび割れが発生する。B 点から見たとき、B 点から C 点までの供用期間が余寿命となる。

ここで、下水道管渠の硫酸劣化の進行は t 則に従うとした上で、点 B から点 C までの余寿命の試算方法を次に示す。 t 則が成り立つ時、式(3)が成り立つ。

$$\frac{t_f}{\sqrt{T_f}} = \frac{t_f + t_r}{\sqrt{T_f + T_r}} \quad (3)$$

ここに、 t_f : 劣化深さ(mm), T_f : 供用年数(年), t_r : ひび割れ発生まで劣化可能な管厚(mm), T_r : 余寿命(年)

式(3)を T_r について解くと式(4)を得る。

$$T_r = \frac{T_f \cdot (t_f + t_r)^2}{t_f^2} - T_f \quad (4)$$

式(4)より得られる余寿命 T_r は、 M_c が M に至り、ひび割れが発生するまでに減少する管厚 t_r から算出される残された劣化進行時間を示す。これを下水道管の余寿命とみなす。

しかし、これは硫酸劣化の進行にコンクリートの侵食を伴わないという仮定の下で算出されるものであり、侵食を伴う硫酸劣化の場合には適用できない。

4.4 劣化診断フローの提案

下水道管渠損傷の分類とその判断基準

下水道管渠に必要とされる機能は、水密性、水の流れやすさ、継手の健全性、および外圧

表-2 目視調査から対策を必要と判断する致命的損傷と補修可能な損傷の程度（案）

	劣化現象	対策が必要とされる劣化程度
致命的損傷	上下方向のたるみ	管渠内径700mm未満 内径以上 管渠内径700～1650mm 内径の1/2以上 管渠内径1650～3000mm未満 内径の1/4以上
	継手部のズレ	脱却
	壁面の損傷	全体的損傷
	軸方向ひび割れ	幅2mm以上
	周方向ひび割れ	幅5mm以上
	錆汁や鉄筋露出	確認され次第
	止水処理できない大きな損傷	浸入水が噴出している
補修可能な損傷	上下方向のたるみ	管渠内径700mm未満 内径の1/2以上 管渠内径700～1650mm 内径の1/4以上 管渠内径1650～3000mm未満 内径の1/8以上
	継手部のズレ	70mm未満
	継手破損	ゴムリングの脱却 円周の1/4以上
	壁面の損傷	全体的損傷でない
	軸方向ひび割れ	幅2mm未満
	周方向ひび割れ	幅2mm～5mm
	止水処理が可能な損傷	浸入水が流れている
	樹木根侵入・油脂の付着	内径の1/2未満閉塞

に対する抵抗性である。これら必要とされる機能を満足する上で支障を生じる劣化のうち、目視調査で判断可能な致命的損傷は、1) 硫酸劣化から生じる鉄筋の露出や錆汁（硫酸劣化が鉄筋の露出や錆汁を生じさせるまで進行した場合、下水道管渠の耐荷性能は著しく低下すると考えられるため）、2) 軸方向の大きなひび割れ（軸方向にひび割れが生じるということは、既にその下水道管渠のひび割れ荷重以上の負荷を受けていることが推測されるため）、3) 止水処理できないほどの大きな損傷（補修では要求される性能の回復が見込まれないため）、上下方向のたるみ等による水の流れやすさの低下である。

このような劣化が生じているもののうち、過度の損傷やたるみ等により管更生でも補修が見込まれない場合は布設替えが必要と考えられ、それ以外の場合には自立管による管更生が必要であると考えられる。

一方、目視調査で判断可能である劣化のうち補修可能なものとして、周方向のひび割れ、幅2mm未満の局所的な小さなひび割れ、樹木根の侵入、堆積物や障害物による水流の阻害、継手部のズレ、継手部材の劣化、継手部損傷等が挙げられる。これらに関しては、二層構造管による補修が可能であると考えられる。

ここで提案する劣化診断では、目視調査により判定できる劣化を致命的損傷と補修可能な損傷に分類し、その判定基準を表-2のように定め、表中に示す劣化程度以上で何らかの対策を必要とするとした。この判定基準の設定には、(社)日本下水道協会や(社)日本下水道管路管理業協会¹⁵⁾が提示する判定基準を参考に作成した。

劣化診断の手順と診断フローの提案

これまでの結果を基に、下水道管渠の劣化診断フロー（図-5）を提案する。

目視調査を行い、補修の必要がないものと、対処が必要なものに分類する。ここで、気相部が形成される部位では硫酸劣化が懸念される。管上部が腐食により変質・変色しているかどうかを目視により確認し（管上部劣化の有無）、対策の要不要を判断する。対策が

必要な場合、致命的損傷か否かを判断し、致命的損傷がある場合には自立管による管更生で対応可能か否かを判断する。過度なたるみ等で管更生による補修の見込みがない場合、布設替えを行う必要があると判断する。

また致命的損傷でない場合、目視調査で詳細調査が必要か否かを判断する。詳細調査では必要に応じドリル穿孔による劣化深さ計測を行い、曲げ耐力判定および余寿命の推定を行う。曲げ耐力判定の結果、JISに定められるひび割れ荷重値を満たす場合は継続して供用可能と判断できる。曲げ耐力不足と判定された場合、自立管による管更生を適用する。局所的なひび割れや腐食はあるが、下水道管渠の耐力に問題のない場合は二層構造管による止水補修を行う。

また、余寿命推定では、試験体の実測値による劣化深さから算出した余寿命推定値のばらつきを考慮して、次の点検時期を推定された余寿命から5年以内を目途として計画してよいと考えられる。

以上のように、目視で判断可能なものは目視で、目視では判断できない場合は健全部材厚さを用いた耐力判定を実施することとした。以下、下水道管渠診断フローによる判定結果を3つのケースに分類し、さらに細かく～に分類するフローを示す。

(1)致命的損傷がない場合

（管上部に劣化なし）

各種欠損や漏水がない場合は問題なく供用できると判断し、対策不要とする（判定 ）。

継手破損、継手部のズレ、部分的な壁面の破損、幅5mm未満の周方向の大きなひび割れ、幅2mm未満の軸方向の小さなひび割れ、浸入水、樹木根侵入など、何らかの欠損が見られる場合、漏水、流水能力の低下が懸念されるため二層構造管で補修を行う（判定 ）。

(2)致命的損傷がない場合

（管上部に劣化あり）

硫酸劣化による管頂部健全部材厚さ減少のため、耐力低下が懸念される。健全部材厚さを求め、表-1から下水道管渠の外圧に対する抵抗性の有無を判断する。劣化深さが表-1

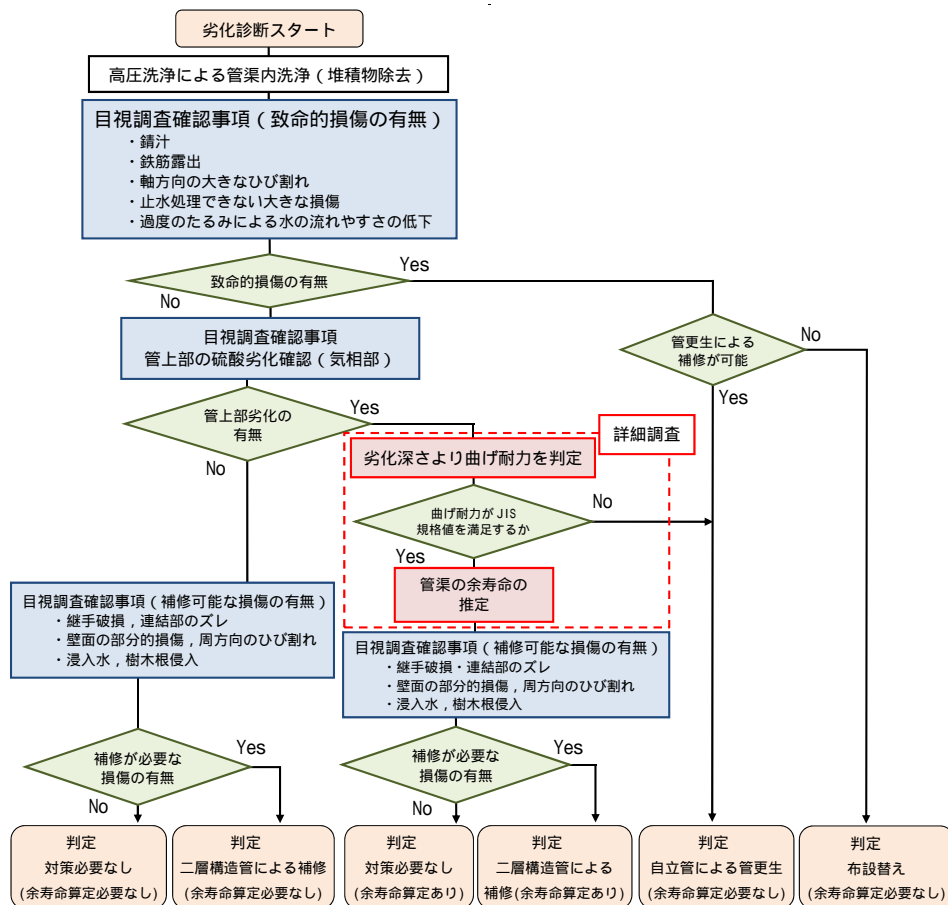


図-5 提案する下水道管渠劣化診断フロー（案）

に示す許容劣化深さより小さい場合、下水道管渠は外圧に対する抵抗性があると判断される。このとき下水道管渠の余寿命推定を行い、次回の点検時期を決定する（推定された余寿命から5年以内）。各種欠損や漏水がない場合は対策の必要はない（判定）。継手破損、継手部のズレ、部分的な壁面の破損、幅5mm未満の周方向の大きなひび割れ、幅2mm未満の軸方向の小さなひび割れ、浸入水など、何らかの欠損が見られる場合は、二層構造管による補修を行う（判定）。許容劣化深さが表-1に示す値より大きい場合、下水道管渠には外圧に対する抵抗性を期待できない。この場合は十分な耐力を得るため、自立管による管更生を行う（判定）。

(3)致命的損傷がある場合

目視調査により、錆汁、鉄筋露出、軸方向の大きなひび割れ、止水処理で対処できない致命的損傷や欠損が見られる場合、下水道管渠は終局限界状態に達していると判断する。その上で、目視調査で致命的損傷が認められるが、管更生で対処できると判断される場合には、耐力を十分に持たせることのできる自立管による管更生を行う（判定）。管更生では対処できないような過度の損傷、たるみが認められた場合には布設替えが必要と判断する（判定）。なお、これらの場合、下水道管渠は既に終局限界状態に達しており、下水道管渠の更新を前提とするため耐力判定や余寿命推定を行う必要はない。

以上のように、提案する診断フローに沿って、遠心力鉄筋コンクリート製下水道管渠に必要な機能を満足するか否か、また、余寿命を推定する手法を提案した。この診断法を導入することが、下水道管渠のLCMの確立への一助となるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

Diagnosis of Load Bearing Capacity of Sewage Pipes Deteriorated By Sulfate Attack, Daisuke YAMAMOTO, Hidenori HAMADA, Yasutaka SAGAWA, Nurazuwa Md Noor, Proceedings of the Seventh International conference on Concrete Under Severe Conditions-Environment and loading, Volume2, pp.1280-1288, 2013

Evaluation of compressive strength of concrete using small diameter core; Daisuke Yamamoto, Hidenori Hamada, Yasutaka Sagawa, Toshiumi Hiromitsu, 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologied-SCMT3, e309, 2013

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

山本大介 (YAMAMOTO, Daisuke)

九州大学大学院・社会基盤部門・技術職員

研究者番号：40398095