

# 下水道管の硫酸劣化程度を考慮した複合管更生工法の耐力評価における研究

深見 桜

福岡大学 工学部 社会デザイン工学科

概要：老朽化下水道管の複合管更生工法について、硫酸劣化が既設管とグラウト材の一体性に及ぼす影響を実験と FEM 解析で検討した。劣化により圧縮強度は低下し、付着強度は 1/15～1/5 まで低下した。解析の結果、現行グラウト材で既設管のひび割れ荷重を上回る補強効果が得られ、材料定数を 30～39%低減しても同等の耐荷性能を確保できることが示された。

## 1. はじめに

日本国内の下水道管路は総延長約 50 万 km に達し、社会活動を支える重要インフラである。しかし、これらの管路の多くは高度経済成長期に集中的に整備されたものであり、標準耐用年数の 50 年を経過したものが、約 4 万 km (全体の約 8%) に及んでいる。この老朽化管路の割合は今後加速度的に増加し、20 年後には約 21 万 km (約 40%) に達すると予測されている<sup>1)</sup>。現状、地方自治体の財政逼迫や技術職員の不足、都市交通への影響などの制約により、更新率は低い水準に留まっており、既存ストックの長寿命化に資する効率的かつ信頼性の高い更生技術の確立が課題となっている。

下水道管路特有の劣化現象として、硫化水素に起因する生物化学的な硫酸劣化が挙げられる。この現象は、下水中の硫酸塩が微生物の還元作用によって硫化水素ガスとなり、管頂部の結露水中で硫酸酸化細菌によって硫酸が生成されることで進行する<sup>2)</sup>。そのため、下水が嫌気状態になりやすい低流速・停滞区間や、高温で有機物が豊富で密閉された空間などは、硫酸が生成され易い条件となる。硫酸劣化はコンクリート組織を脆弱化させ、管路の破損に伴う道路陥没などの深刻な事故の要因となっている。

こうした背景から、道路の開削を伴わず施工可能な「更生工法」が多く採用されている。なかでも複合管更生工法は、交通負荷や騒音などの周辺環境への影響を最小限に抑えられるため、都市部の幹線道路下や住宅密集地における中～大口径の管路で採用される工法である。本工法は、既設管の内部に有機系の表面部材（永久型枠）を設置し、その隙間にグラウト材を充填することで、既設管と更生材が一体となった構造体を構築するものである<sup>3)</sup>。本工法の設計においては、更生後の流路断面を最大限に確保しつつ、既設管と更生材を確実に一体化させて剛性を向上させることが重要となる。

しかしながら、実際の施工現場においては、硫酸劣化によって表面が脆弱化（多孔質化）した既設管に対してグラウト材を充填することになる。現行の設計理論は「既設管と更生材の完全な一体化」を前提としているが、劣化層が残存する状態での付着性能や、応力伝達性については、未だ十分に検証されていない。

そこで本研究は、グラウト材の性能把握および硫酸劣化部を有する既設管とグラウト材の接着性、応力伝達性に及ぼす影響を実験で検討した。具体的には、まず硫酸劣化した既設管を模擬したモルタル試験体に実際の更生工法に用いられている種々のグラウト材を打設し、力学的特性を把握した。次に、実験で得られたパラメータを用いて有限要素法(FEM)解析を実施し、管路全体の耐荷性能について、硫酸劣化部を考慮した場合と硫酸劣化を考慮しない現行の設計理論との差異について検討を行った。

## 2. 既設管とグラウト材の一体性に関する実験的検討

### 2.1 グラウト材の性能評価

#### 1) 供試体概要および配合

グラウト材には、表-1 に示す実際の更生工法に使用されている代表的な 3 種類 (a, b, c) を用いた。

#### 2) 試験項目および方法

##### (a) 圧縮強度・静弾性試験

試験は JIS A 1108 および JIS A 1149 に準拠して実施した。供試体形状は  $\phi 50 \times 100 \text{mm}$  の円柱とし、材齢 28 日間までは湿布養生、その後は気中養生とした。材齢 28 日および 91 日において試験を行い、3 本の平均値を試験結果とした。

##### (b) 硫酸浸漬試験

供試体 ( $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ ) を材齢 28 日間まで湿布養生した後、硫酸浸漬試験を行った。硫酸水溶液の濃度は pH0.5, 1.0, 3.0 の 3 水準とした。なお、pH0.5 は、JIS 原案「コンクリートの溶液

浸せきによる耐薬品性試験方法(案)」に基づき、pH1.0 および 3.0 は実際の下水道管の調査結果に基づいて設定したものである。浸漬開始から経時で質量測定を行うとともに、所定の浸漬材齢にて供試体を割裂し、その断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した。この際の呈色範囲から劣化深さを確認した。

## 2.2 既設管とグラウト材の一体性評価

### 1) 供試体概要および配合

既設管を模擬したモルタル供試体には、セメントに普通ポルトランドセメント (OPC, 密度: 3.15g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3340cm<sup>2</sup>/g) および細骨材として海砂 (表乾密度: 2.58g/cm<sup>3</sup>) を使用した。水セメント比(W/C)は、現行の既設管と同等の36%とした。既設管の硫酸劣化部を再現するため、28日間の湿布養生を終えた OPC 供試体を、pH0.5 および 1.0 の硫酸水溶液に3週間浸漬させた。これにより、図-1 に示すような異なる劣化状況 (劣化深さ、表面状況) の異なる打継ぎ面を作製した。なお、pH0.5 の条件は、強酸環境であるため、反応生成物である二水石膏の多くが損失し、細骨材の露出した劣化層となった。劣化深さ (フェノールフタレイン未呈色域) は平均 0.6mm であった。一方の、pH1.0 の条件は、二水石膏が剥離せずに表面に残存した状態の劣化層となった。劣化深さは平均 0.9mm であった。

これらの硫酸劣化面を水洗いした後、各種グラウト材を打継ぎ、図-2 に示す一体性評価用の各種供試体を作製した。なお、本検討ではグラウト材「a」および「b」の2種類を使用した。

### 2) 試験項目および方法

#### (a) 圧縮強度・静弾性試験

複合管を模擬した供試体は、前述の硫酸劣化を施した OPC 供試体 (φ50×50mm) に、グラウト材 (φ50×50mm) を打継ぎ、φ50×100mm の円柱形とした。

打継ぎ後は湿布養生を行い、6週間後に JIS A 1108 に準拠して圧縮強度を測定した。なお、硫酸劣化によるばらつきを考慮し、測定結果は3本の平均値を用いた。

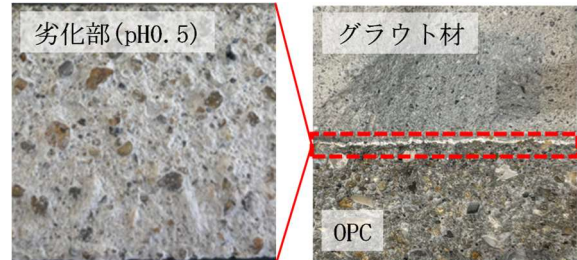
#### (b) 引張付着強度試験

硫酸劣化部とグラウト材の引張付着強度を評価するため、建研式によって引張付着試験を実施した。供試体は、図-2 に示す様にあらかじめ硫酸劣化させた平板状の OPC モルタルの上に、40×40×10mm でグラウト材を打設して作製した。材齢4週経過後、1供試体につき6箇所の付着強度を測定し、その平均値を算出した。

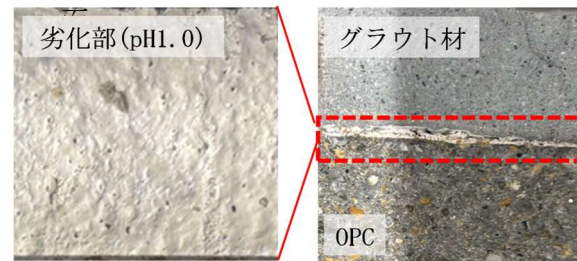
#### (c) 走査電子顕微鏡 (SEM) 観察

表-1 グラウト材の材料構成と水セメント比

	グラウト材			W/C (%)
	セメント	骨材	混和剤	
a	高炉B種	石灰石砕	収縮低減材, 減水材, 消泡材, 増粘剤	21.2
b	早強	珪砂	収縮低減材, 減水材, 消泡材, 水中分離混和剤	20.0
c	普通	珪砂	膨張剤, 炭酸カルシウム粉末, 減水剤, 増粘剤, 消泡材	24.0



(a) pH0.5の劣化状況と供試体打継ぎ断



(b) pH1.0の劣化状況と供試体打継ぎ断

図-1 複合管を模擬した供試体の劣化状況および供試体断面

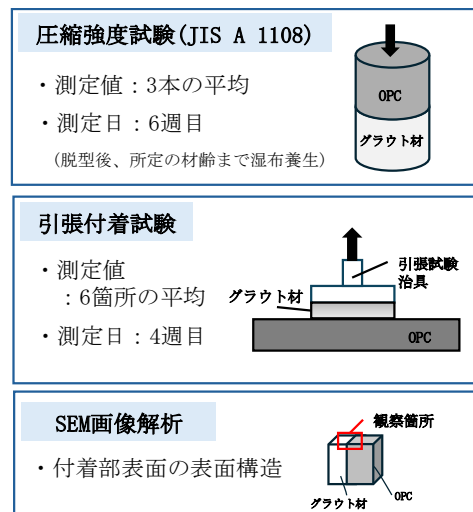


図-2 各試験概要

モルタルとグラウトの界面における微細構造を確認するため、走査電子顕微鏡 (SEM) による観察を行った。まず、20×20×10mm の硫酸劣化させたモルタルに、20×20×10mm のグラウト材を打継ぎ、一辺 20mm の立方体の供試体を作製した。観察部位は、グラウト材と劣化モルタルの打継ぎ

界面とした。観察用試料は、界面が露出するように表面研磨した後、50°Cの炉乾燥で乾燥させてから観察に供した。

## 2.3. 実験結果

### 2.3.1 グラウト材の性能

図-3 に、材齢 28 日および 91 日における各グラウト材の圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。材齢 91 日時点の圧縮強度は、高い順にグラウト材 b(早強)>a(高炉)>c(普通)となった。グラウト材の種類により最大で 20N/mm<sup>2</sup>程度の強度差が生じており、現在更生工法で使用されている現行のグラウト材における力学的特性には大きな開きがあることが確認された。

図-4 に硫酸浸漬試験による質量変化率を、図-5 に pH0.5 の硫酸条件下で 35 日間浸漬した供試体の割裂面におけるフェノールフタレイン溶液の呈色状況（一例）を示す。まず、最も過酷な pH0.5 の条件において、グラウト材 b が最も顕著な質量減少を示し、次いで c, a の順となった。b は他と比較して水セメント比が最も小さいものの、混和材を含まずカルシウム含有量が多いことから、硫酸劣化の進行が速かったと考えられる。また、図-5 の呈色状況を確認すると、a は未呈色域が広く劣化層が表面に残存しているのに対し、b および c は劣化層が保持されずに剥落する状況が確認された。次に、pH1.0 の条件では、b のみ浸漬 21 日目から質量減少が認められた。浸漬 21 日目までは硫酸劣化による反応生成物が表面に残存していることを目視で確認したが、その後の膨張圧によって 35 日目までに反応生成物が剥落し、急激な質量減少に至ったと推察される。一方、pH3.0 の条件においては、いずれの材料も質量を維持している。以上の結果より、グラウト材の種類によっては、地震時の変形等により表面部材のズレやひび割れが生じた際、グラウト材の種類によっては厳しい硫酸劣化環境下で性能を長期間維持できない懸念がある。今後、更生工法に用いるグラウト材の選定においては、強度特性だけでなく耐硫酸性能も重要な指標として求めていく必要がある。

### 2.3.2 既設管とグラウト材の一体性評価

図-6 に既設管を模擬した OPC 供試体にグラウト材を打継いだ際の圧縮強度を示す。硫酸劣化がない健全な状態と比較して、硫酸劣化層が存在する場合には、pH0.5 および pH1.0 のいずれの劣化条件においても圧縮強度が低下する結果となった。特に pH1.0 の条件では、pH0.5 よりも強度低下が顕著であった。これは、図-1 に示した通り、pH1.0 では表面に二水石膏が剥離せずに付着しており、これが打継ぎ界面において

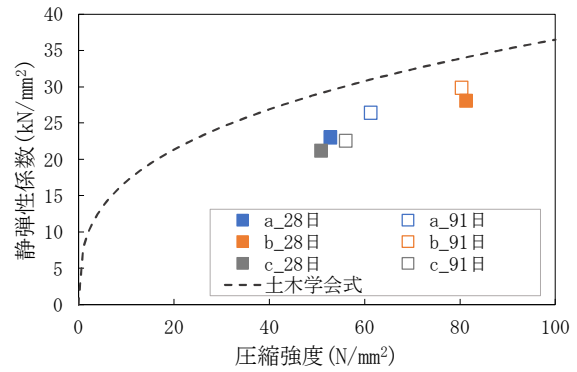


図-3 グラウト材の圧縮強度と静弾性係数

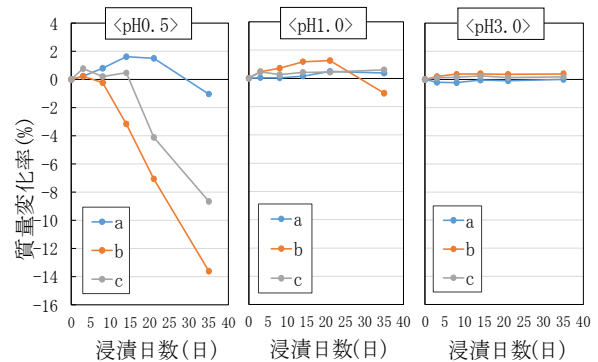


図-4 グラウト材硫酸浸漬試験における質量変化率

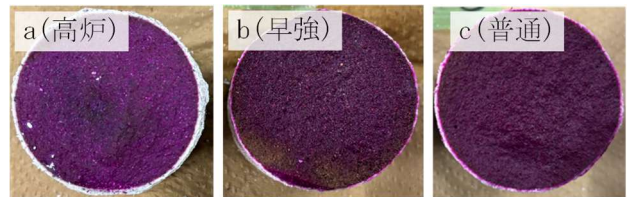


図-5 断面の呈色状況 浸漬 35 日間 (pH0.5)

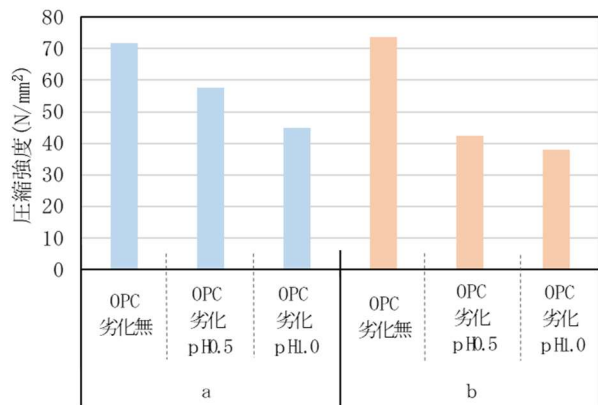


図-6 圧縮強度試験の結果

構造的な弱点となったと考えられる。図-7 に示す界面部の SEM 観察像を確認すると、劣化層には多数の微細ひび割れや空洞が存在していた。

図-8 には、建研式による引張付着試験の結果を示す。付着強度は、圧縮強度と同様に硫酸劣化の

影響を強く受け、更生管の設計基準値<sup>4)</sup>に対する値と比較して、約 1/15~1/5 程度まで大幅に低下した。破壊状況を確認すると、いずれの劣化条件においてもポーラスな劣化層部分で剥落が生じていた。特に pH1.0 の条件では、ほぼすべての供試体において劣化層に内部での破壊が確認された。以上の結果から、既設管に硫酸劣化層が残存している場合、グラウト材との十分な滑り抵抗性が確保できず、地震等の外部応力を受けた際に付着が完全に消失するリスクが示唆された。

### 3. FEM 解析による複合管更生工法の耐荷性能評価

本章では硫酸劣化が生じた既設管をグラウト材で更生した際の構造性能と、補強材として求められるグラウト材の必要性能について、数値解析により検討した。解析には汎用有限要素法ソフトウェア ANSYS 2024R2 の静的構造システムを用いた。

#### 3.1 解析モデルと解析条件

解析モデルを図-9、材料定数を表-2 に示す。材料定数における既設管は設計計算書に記載の値を用いた。硫酸劣化層とグラウト材は、室内試験における実験値を採用した。劣化層のみの材料定数を直接算出することは困難であったため、劣化供試体の最大荷重は健全部の荷重と劣化部の荷重の和で表されると仮定した。これに基づいて(劣化供試体の最大荷重-健全部の面積×健全部の応力)/劣化部の面積から簡易的に材料定数を算出した。使用した供試体は、φ50×100mm の OPC 供試体を 14 日間の湿布養生を行い、pH1.0 の硫酸水溶液に 28 日間浸漬させたものを用いた。圧縮試験 (JIS A 1108) にて測定を実施し、硫酸劣化によるばらつきを考慮して、測定値は 6 本の平均とした。また、劣化層の静弾性係数は得られた劣化層の圧縮強度から土木学会式を用いて推定した。

図-9 に示すケース 1 は健全時、ケース 2, 3 は層厚 10, 25mm の硫酸劣化を生じ<sup>5)</sup>、硫酸劣化層の内側にグラウト材による更生を行った場合、ケース 4 は内側鉄筋から外側へ 15mm の範囲まで硫酸劣化が進行し、硫酸劣化層が層厚 10mm を残して内側鉄筋と共に剥落した後にグラウト材による更生を行った場合を想定している。いずれのケースも管の外径と長さは同一である。グラウト材は表-2 に示す a~c の 3 種類を用いた場合を計算した。解析モデルは既設管、硫酸劣化層およびグラウト材はソリッド要素、鉄筋(φ4mm)を梁要素でモデル化し、最大要素サイズは 10mm とした。スパイラル鉄筋の配筋は実

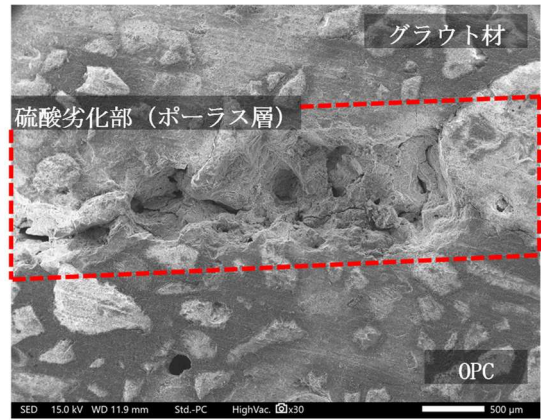


図-7 SEM 観察 (OPC + 硫酸劣化(pH0.5)+ b)

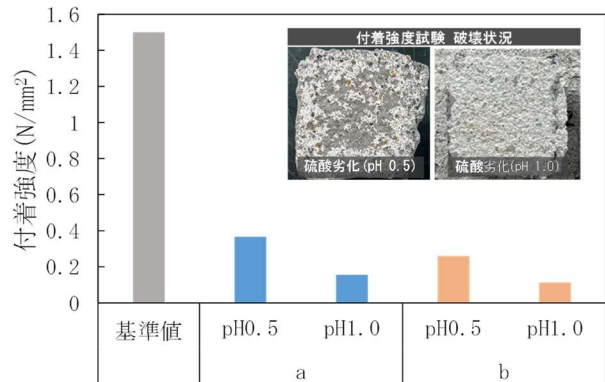


図-8 引張付着試験結果

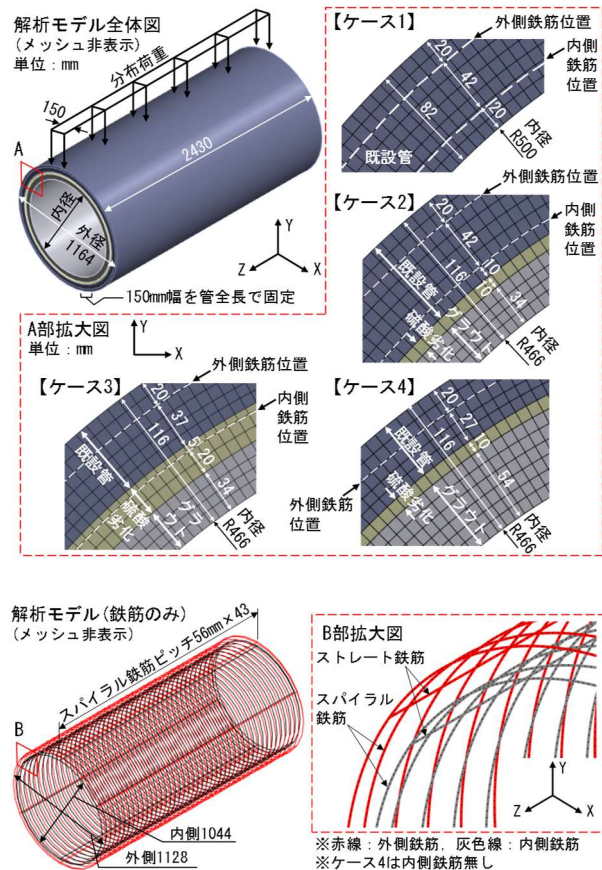


図-9 解析モデル

物を忠実に再現した。接触条件は、コンクリート要素と鉄筋要素の節点共有が困難なため、コンクリート要素表面に鉄筋要素を貼り付ける接触条件とした。既設管と硫酸劣化層の接触面では節点を共有させたが、硫酸劣化層とグラウト材の界面については、実験結果に基づき付着強度の低下を考慮し、摩擦係数( $\mu=0.5$ )のすべり条件を設定した。解析モデルの総要素数は約 78~128 万、総節点数は約 106~336 万である。境界条件は、管下端の幅 150mm を管全長にわたって完全固定とした。荷重は管上端の幅 150mm の範囲に分布荷重として载荷した。この载荷・支持条件は、ヒューム管規格 JSWAS A-1 に規定される外圧試験の支持幅、载荷幅に準拠したものである<sup>6)</sup>。

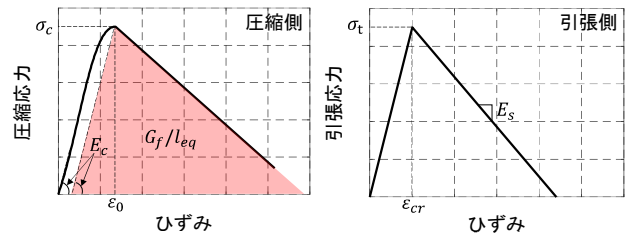
コンクリートの応力ひずみ関係を図-10(a)に示す。圧縮側は圧縮強度までは Saenz の式を用い<sup>7)</sup>、圧縮強度後の軟化は圧縮破壊エネルギー  $G_f$  と要素寸法  $l_{eq}$  に基づく直線とした。 $G_f$  は中村・桧貝の提案式より算出した<sup>8)</sup>。引張側は引張強度を圧縮強度の 1/10 とし、 $E_s$  は土木学会のコンクリート標準示方書の引張軟化曲線に基づく値としたが<sup>9)</sup>、解析ソフトウェアの都合上初期剛性のみを用いている。鉄筋の応力ひずみ関係は図-10(b)に示す 2 直線モデルを用いた。鉄筋の付着すべりは鉄筋の軸方向にばねを設け、ばね特性は島らの付着応力-すべり量の式より図-10(c)のように設定した<sup>10)</sup>。付着応力の軟化域はひび割れ発生時までを対象としているため考慮していない。

### 3.2 グラウトの必要性能の検討

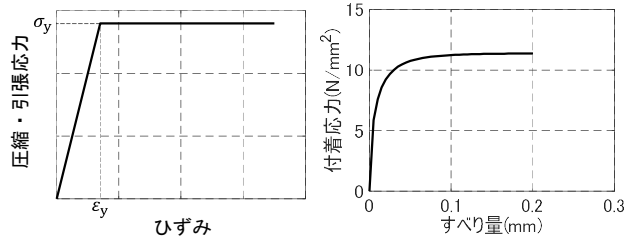
既設管同等の耐荷力を担保しても、硫酸劣化部の影響により複合管更生の定義は満たされないため、図-4 に示す 3 つの更生ケースについて、グラウト材の必要性能を検討する。はじめにケース 1 の既設管のひび割れ荷重を求めると、表-3 に示す通り 38.0kN/m であった。これは、既設管に生じる最大主応力  $\sigma_1$  が表-2 に示すひび割れ応力  $\sigma_t$  を超えた際の荷重であるが、JSWAS A-1 (呼び径 1000, 1 種) のひび割れ荷重 41.3kN/m と比較して小さい<sup>4)</sup>。両者に差を生じた原因は、表-3 のひび割れ荷重は数値解析にてひび割れ応力を超過した瞬間の荷重であるのに対し、JSWAS のひび割れ荷重は管に 0.05mm のひび割れを生じたときの試験機が示す荷重であるためと考えられる。よって、グラウト材の必要性能の検討では、より大きいひび割れ荷重である 41.3kN/m を用いる。なお、 $\sigma_1$  を生じた箇所は、既設管、グラウト層のいずれの場合も管内側の载荷点直下および支点直上であった。

表-2 材料定数

	既設管	硫酸劣化層	グラウト材			鋼(鉄筋)
			a	b	c	
$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	23.0	18.2	21.1	21.5	20.9	77.0
E (N/mm <sup>2</sup> )	33000	4140	23030	28080	21210	200000
$\nu$	0.167	0.00001	0.167	0.167	0.167	0.3
$\alpha_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	45	0.53	61.9	80.5	50.4	235
$\alpha_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	4.5	0.05	3.67	3.40	2.06	235



(a) コンクリートの  $\sigma - \epsilon$  関係



(b) 鉄筋の  $\sigma - \epsilon$  関係 (c) 付着応力とすべり量

図-10 応力ひずみ関係と付着応力-すべり量

表-3 ひび割れ時の荷重とグラウトの必要性能

	劣化無し	(a)既設管 材料定数使用			(b)材料定数 低減		
		2	3	4	2	3	4
解析ケース	1	2	3	4	2	3	4
低減率(%)	—	—	—	—	39	30	37
$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
$\nu$	0.167	0.167	0.167	0.167	0.102	0.117	0.105
E (N/mm <sup>2</sup> )	33000	33000	33000	33000	20130	23100	20790
$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	4.5	4.5	4.5	4.5	2.7	3.2	2.8
$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	45.0	45.0	45.0	45.0	27.5	31.5	28.4
ひび割れ荷重 W (kN/m)	38.0	67.5	64.1	67.3	41.3	41.3	41.3

ケース 2~4 のグラウト層に既設管と同じ材料定数を適用する。そこから、材料定数を一律に低減させ、既設管の外圧強さと同等になる低減率を求める。グラウト層に既設管と同じ材料定数を適用した場合のひび割れ荷重を表-3(a)に示すが、グラウト層に生じる  $\sigma_1$  が  $\sigma_t$  を超えた際の荷重である。ケース 3 は硫酸劣化層が厚いため、他ケースよりもひび割れ荷重が小さい。材料定数を一律に低減させ、ひび割れ荷重が 41.3kN/m になったときの低減率を表-3(b)に

示す。表より、グラウトに必要な性能は既設管の材料定数を30～39%程度低減した値であった。

### 3.3 更生した管のひび割れ時荷重

図-4に示す3つの更生ケースについて、グラウト層に表-2に示す材料定数を与えた場合のひび割れ時の外圧荷重 $W$ を算出する。表-4にひび割れ時の外圧荷重の結果を示すが、グラウト層の $\sigma_1$ が $\sigma_t$ を超えた際の荷重である。表より、ひび割れ応力の小さいグラウトcを除き、ケース1の $W$ を上回る結果となった。一方、既設管や鉄筋の応力は表-2の $\sigma_c$ 、 $\sigma_t$ と比較してかなり小さい値となった。

以上の検討より、硫酸劣化による脆弱化(多孔質化)の存在は、現行設計の前提条件である「既設管と更生材の完全な一体化」を困難にする要因であることが示された。現行のグラウト材を用いた場合、更生後のひび割れ荷重を既設管単体時以上に向上させることは可能である。しかしその一方で、地震等の外力を受けた際に既設管とグラウトが完全分離し、想定以上の耐荷性能の低下を招く恐れがあること、表面部材のずれや継手部から浸入する硫酸に対し、グラウト材の種類によっては十分な耐久性を確保できないケースが予想される。

今後、複合管更生工法において既設管との一体化を図り流量を最大限確保するためには、硫酸劣化部の完全な除去手法の検討、けい酸塩系表面含浸材を用いた劣化層の改質、劣化損傷が著しく一体化が困難な場合には、更生材を自立管として設計する手法の確立が必要であると考えられた。

### 4. まとめ

以下に本研究の成果を示す。

- (1) 硫酸劣化によって形成されるポーラス層により、圧縮強度および付着強度は低下する。
- (2) 付着強度は、ポーラス層により約1/15～1/5程度に低下した。
- (3) 硫酸劣化を受けた既設管への更生は、現行のグラウト材でも補強後のひび割れ荷重を既設管単体時以上に向上させることは可能であった。
- (4) 既設管と同等の補強効果を得るために要求されるグラウト材性能は、既設管の材料定数から30～39%低減させた範囲内にあると見積もられた。

### 5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、福岡大学の樋原弘貴教授、下妻達也助教、橋本涼太助教に多大なご協力をいただきました。また、本研究は、一般社団法人九州建設技術管理協会による「令和7年度建設技術研究開発助成」のもとで実施されました。ここに記し、深く謝意を表します。

表-4 ひび割れ時の外圧荷重の結果

グラウト種類	解析モデルケース	変位 $\delta$ (mm)	応力(N/mm <sup>2</sup> )					ひび割れ荷重 $W$ (kN/m)
			既設管		グラウト		鉄筋 $\sigma_{max}$	
			$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_1$	$\sigma_3$		
a	2	0.38	2.5	-8.8	3.67	-2.9	12.9	61.7
	3	0.39	2.3	-6.6	3.67	-2.8	15.8	57.3
	4	0.38	2.4	-9.1	3.67	-2.8	17.0	61.6
b	2	0.30	2.0	-7.4	3.40	-2.7	9.2	53.8
	3	0.30	1.9	-5.6	3.40	-2.6	11.6	50.4
	4	0.30	2.0	-7.8	3.40	-2.6	14.6	54.4
c	2	0.23	1.4	-5.1	2.06	-1.6	8.1	35.5
	3	0.23	1.3	-3.9	2.06	-1.5	9.8	32.9
	4	0.23	1.4	-5.2	2.06	-1.5	9.8	35.2

### 6. 参考文献

- 1) 国土交通省. “下水道の維持管理”. 国土交通省. [https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd\\_sewage\\_tk\\_000135.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewage_tk_000135.html).(参照 2026-04-06) .
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部: 下水道事業のストックマネジメント実施に関するガイドライン-2015年版-, 2015.
- 3) 公益社団法人日本下水道協会: 管きよ更生工法における設計・施工管理ガイドライン-2017年度版-, 2017.7
- 4) 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル, 2017.12
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 国土技術政策総合研究所資料, No.404, pp.11-14, 2007.
- 6) 日本下水道協会: 下水道用鉄筋コンクリート管(呼び径150～3000)JSWASA-1, 2011.
- 7) Saens, L. p. et al.: Disc. of “Equation for the Stress-Strain curve of Concrete” by Desayi and Krishnan, Journal of American Concrete Institute, 61, pp. 1229-1235, 1964.
- 8) Nakamura, H. et al.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, ASCE, pp.471-487, 1999.
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2023.
- 10) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378号, V-6, pp.165-174, 1987.

受理日: 令和 8年 4月 30日