

有限要素法による 鉄筋コンクリート管の内部腐食が耐荷力に及ぼす影響評価

中日本建設コンサルタント(株) 北村亮平
前本尚二

1. はじめに

下水道管路は汚水に由来して発生した硫化水素の影響により、早期劣化を生じることが知られている。硫酸によるコンクリート腐食がひどい場合には、管が壊れて上部の土砂が下水道管路内に流入し、道路陥没を引き起こすことになる。

管路の内部腐食が管の耐荷力に与える影響については、管内面の全体が均一に減厚する場合について既往研究¹⁾に示されているが、管路の内面が部分的に減厚する場合の耐荷力に与える影響については明らかになっていない。

本稿では有限要素法を用いて管路内面の部分的な腐食を想定した解析を行い、管路内面の部分的な腐食が管の耐荷力に与える影響を検討し、その結果を取りまとめる。

2. 管路の劣化箇所

管路施設において硫酸によるコンクリート腐食が発生しやすい箇所²⁾は以下の i ~ iv に示す部分で、コンクリート腐食は管路施設の全体ではなく、極めて局所的に発生する。

- i. 段差・落差の大きい箇所の気相部
- ii. 伏越し管の上流部・下流吐出し部の気相部
- iii. ビルピット排水部の接合部の気相部
- iv. 圧送管の吐出し部の気相部

管のコンクリート腐食が進展すると管の厚さが減少していき、管内部の鉄筋も腐食することから、管の耐荷力が大きく低下する。既存の管で骨材や鉄筋の露出が見られる事例を写真1に、管のコンクリート腐食の概念図³⁾を図1に示す。



写真1 管の腐食状況

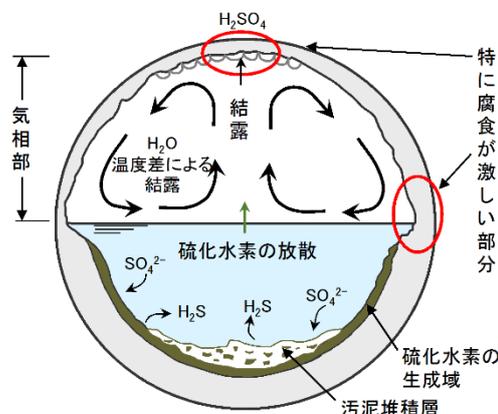


図1 管の腐食概念図³⁾

コンクリート腐食により管内に落下した鉄筋コンクリート管(以下ヒューム管と言う)の破片を写真2に示す。これはφ2,400mmのヒューム管の管頂部から落下したもので、管の外側の鉄筋被りの厚さ分しかコンクリートが残っていなかった事例である。



写真2 落下したヒューム管の破片

3. 解析モデルと管の耐荷力の評価方法

3.1 有限要素法による解析モデル

コンクリート腐食により減厚した場合のヒューム管の耐荷力を検討するため、図2に示した JSWAS A-1⁴⁾の耐荷力試験を有限要素法による解析モデル(以下FEM解析モデルと言う)とする。ヒューム管の設計⁴⁾では、式1を用いて管の仕様や基礎形式を決定しており、管のひび割れ荷重Qから管の耐荷力を求めている。

$$q' = \frac{M_r}{kR^2} = \frac{0.318QR + 0.239WR}{kR^2} \geq F_s \times q \quad (\text{式1})$$

ここで、 q' : ひび割れ荷重Qの管が耐えることのできる等分布荷重(耐荷力) (kN/m²)

Q : ひび割れ荷重(kN/m)

R : 管厚中心半径(m)

W : 管の自重(kN/m)

k : 管の支持条件による係数

q : 管にかかる等分布荷重(kN/m²)

F_s : 安全率(開削工法の場合は、一般的に1.25を用いる)

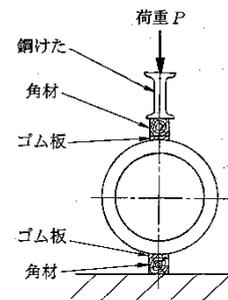


図2 管の耐荷力試験 (JSWAS A-1⁴⁾より抜粋)

二次元平面応力モデルで作成したFEM解析モデルの概要を図3に示す。

管の厚さ方向の分割は20分割とし、コンクリート腐食による減厚を5%ずつ考慮した。管の円周方向の分割は1度刻みとし、部分的な減厚を考慮できるようにした。

管頂部はY方向が自由のローラー支承で、管底部はXY方向とも固定のピン支承とし、管頂部に管のひび割れ荷重を集中荷重として載荷する。

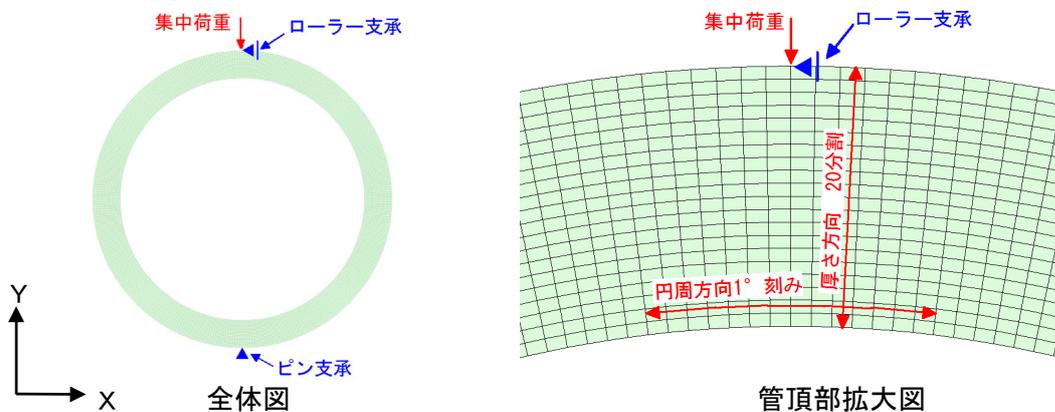


図3 FEM解析モデルの概要

本稿では紙面の都合で、解析対象を小口径管のφ250mmと大口径管のφ2,400mmの2種類とした事例のみ示す。解析対象のヒューム管は1種管で、管の諸元を表1に示す。大口径管は現在の規格には無いが、既設管で多く使用されている管厚の薄いC形を解析対象とした。

ヒューム管のコンクリートの設計基準強度はJSWAS A-1⁴⁾に明記されていないが、p.45に示されている埋設管の耐震性能⁴⁾の計算で管体のヤング係数の記述があり、ヤング係数からコンクリートの設計基準強度を50N/mm²と推定した。

表1 解析対象のヒューム管の諸元(JSWAS A-1⁴⁾)

呼び径	内径 (m)	管厚 (m)	ひび割れ荷重 (kN/m)	管の自重 (kN/m ³)	設計基準強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
250	0.250	0.028	16.7	24	50	33,000
2400	2.400	0.175	64.8			

管の腐食幅は、図4に示すように管中心からの角度で指定し、6度、10度、20度、30度、60度、90度、120度、180度の8種類とした。管の腐食厚は、元の管厚に対して、5%、10%、20%、30%、40%、50%の6種類とした。管の腐食部分は図4に示すように、管の健全な部分に斜めにすり付けた。

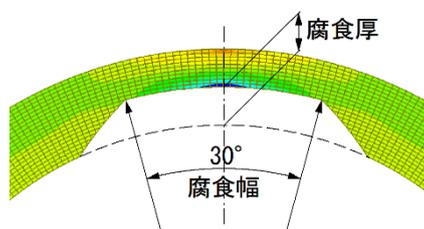


図4 管の腐食幅と管の腐食厚

3.2 管の耐荷力の評価方法

腐食が無いヒューム管にひび割れ荷重を載荷した時の管底部の最大引張応力度をコンクリートの許容引張応力度と考え、コンクリート腐食により減厚した部分の最大引張応力度が許容引張応力度と同じになる集中荷重を解析結果から計算し、その荷重とひび割れ荷重との比率(本稿ではひび割れ荷重比と呼ぶ)を求めて管の耐荷力を評価する。

管の耐荷力試験でヒューム管にひび割れが入るのは図5の①に示すように管底部の内側であるため、管自重Wとひび割れ荷重Qを作用させた時の管底部の内側のコンクリートの引張応力度とコンクリート腐食により減厚した部分の最大引張応力度から、減厚した場合のひび割れ荷重を式2で計算する。式2のβが管の耐荷力の評価に用いるひび割れ荷重比を示す。

$$Q' = Q \times \beta = Q \times (\sigma_o - \sigma_w) / \sigma_o \quad (式2)$$

ここで、Q' : コンクリートが腐食して減厚した場合のひび割れ荷重(kN/m)

Q : ヒューム管のひび割れ荷重(kN/m) (表1参照)

β : 管のひび割れ荷重比

σ_o : 腐食が無い場合に管の自重Wとひび割れ荷重Qを載荷した時の管底部のコンクリートの最大引張応力度(N/mm²)

σ_w : 腐食後の管の自重Wによるコンクリートの最大引張応力度(N/mm²)

σ_Q : 腐食後のひび割れ荷重Qによるコンクリートの最大引張応力度(N/mm²)

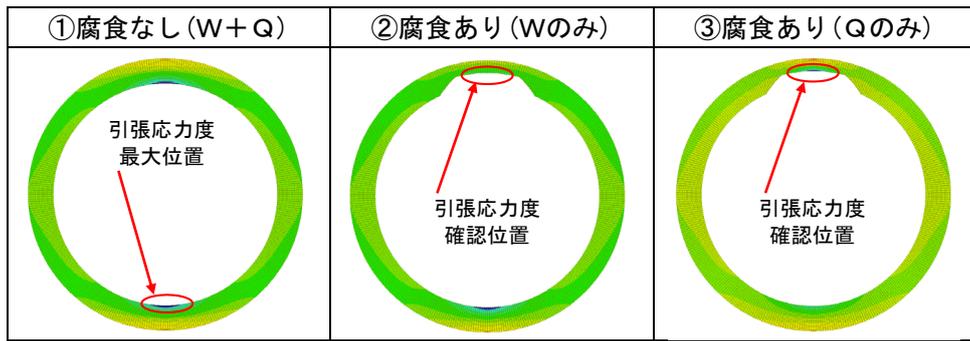


図5 ヒューム管の引張応力度の確認位置

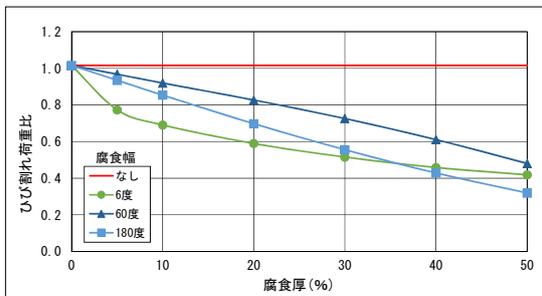
4. 計算結果

4.1 ひび割れ荷重比と腐食厚の関係

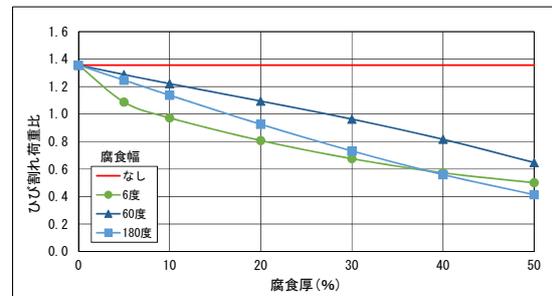
φ250mm と φ2,400mm のヒューム管のひび割れ荷重比と腐食厚の関係を図6に示す。腐食厚が大きくなるに従いヒューム管のひび割れ荷重比が低下していくのが分かる。

腐食が無い状態で管頂部の引張応力度から求めたひび割れ荷重比は、φ250mm のヒューム管の場合は 1.016 倍、φ2,400mm のヒューム管の場合は 1.357 倍となっている。この違いは、自重により管底部と管頂部の応力度に差があるためである。φ250mm のヒューム管では、腐食幅にかかわらず、腐食厚が 5% の時にひび割れ荷重比が 1.0 よりも小さくなる。

φ2,400mm のヒューム管では腐食幅が 6 度の場合、腐食厚が 10% の時にひび割れ荷重比は 1.0 より小さくなる。上半分が全部腐食する腐食幅 180 度の場合は腐食厚が 15% 程度になるとひび割れ荷重比が 1.0 より小さくなる。腐食幅が 60 度の場合は腐食厚が 30% 程度の時にひび割れ荷重比が 1.0 より小さくなる。



(φ250mm)



(φ2,400mm)

図6 ひび割れ荷重比と腐食厚の関係

4.2 ひび割れ荷重比と腐食幅の関係

腐食幅を 6 度～180 度まで変化させ、腐食厚を 5%～50%まで変化させた場合のひび割れ荷重比と腐食厚の関係を図7と図8に示す。φ250mm のヒューム管では図7に示すように、管頂部に腐食が発生するとひび割れ荷重比が大きく低下し、腐食厚が 5% 以上の場合、全てのケースでひび割れ荷重比が 1.0 以下となった。φ2,400mm のヒューム管では図8に示すように、腐食幅が 6 度の時と 180 度の時にひび割れ荷重比の低下が大きい。腐食幅が 6 度から広がるにつれて、ひび割れ荷重比は大きくなっていき、腐食厚によって違うものの、腐食幅がある程度大きくなるとひび割れ荷重比が低下する。φ2,400mm のヒューム管の場合は、

腐食幅 6 度の時を除いて腐食厚が 10% 程度までのひび割れ荷重比はほぼ 1.0 以上となる。

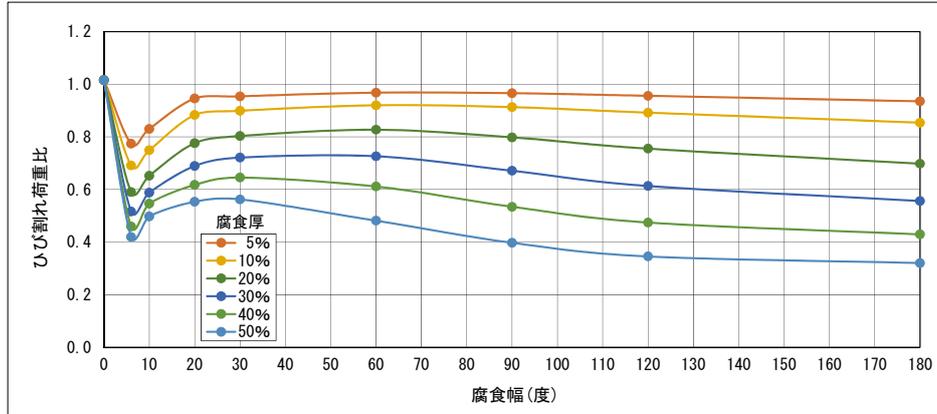


図 7 ひび割れ荷重比と腐食幅の関係 (φ 250mm)

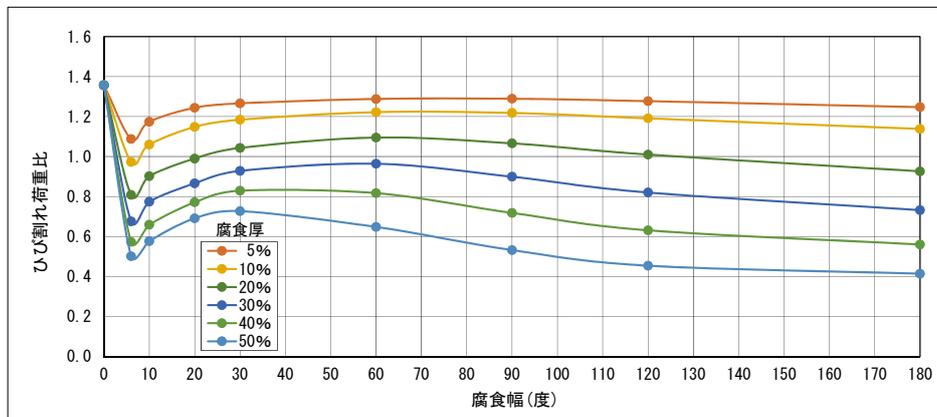


図 8 ヒューム管のひび割れ荷重と腐食幅の関係 (φ 2, 400mm)

4.3 管頂の鉛直変位量と腐食幅の関係

腐食厚 50% の時の管頂部の鉛直変位量と腐食幅の関係を図 9 に示す。管頂部に腐食が発生すると管の鉛直変位量が大きくなり、腐食幅が 6 度～60 度までは鉛直変位があまり進まずに、腐食幅が 60 度を超えると急に鉛直変位が大きくなっている。

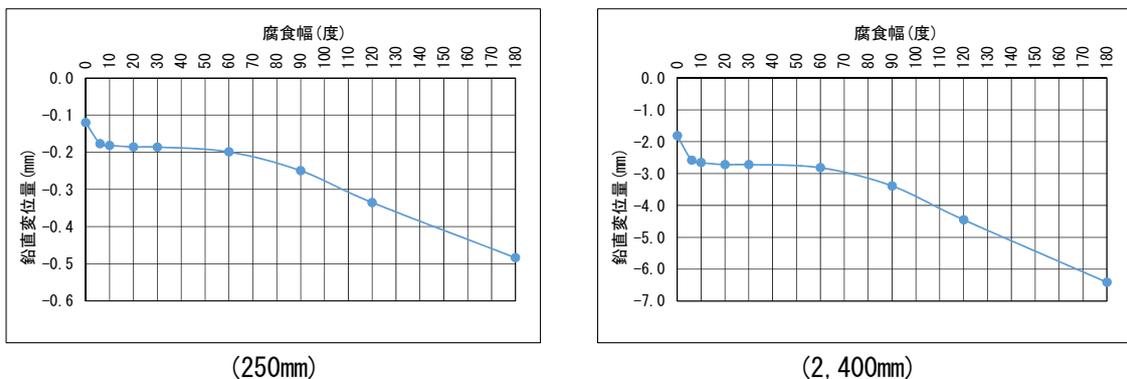


図 9 管頂の鉛直変位量と腐食幅の関係 (腐食厚 50% の場合)

腐食厚 50% の時の φ 250mm ヒューム管の変形図を図 10 に示す。

腐食幅が小さい時には、腐食部分に応力集中が見られ、腐食幅が広がるにつれて、管の上

半分部分の変形が全体的に広がっている。腐食幅が 60 度を超えると減厚部分の変形が大きくなり、耐荷力が低下していく。

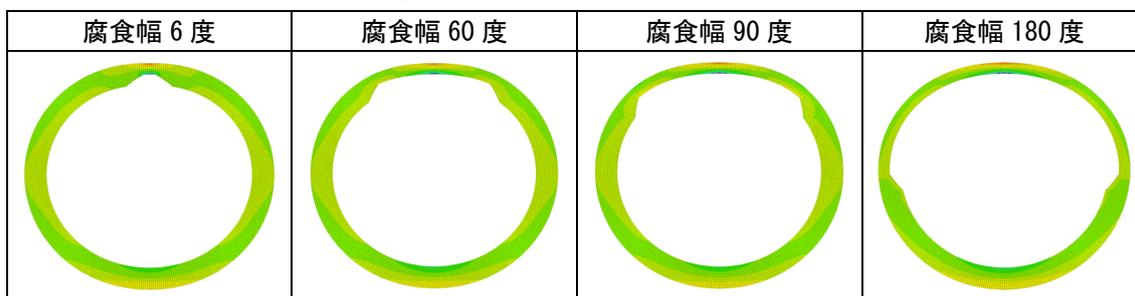


図 10 φ250mm ヒューム管の変形図(腐食厚 50%の場合)

5. まとめ

管の部分的な内部腐食が管の耐荷力に与える影響について以下のことが分かった。

- ①小口径管の場合は自重が小さいため耐荷力の余裕が少なく、少しでもコンクリート腐食による減厚が発生するとひび割れ荷重比が 1.0 を下回る。
- ②腐食幅が変化する場合、腐食幅が 20 度～60 度の範囲では耐荷力の低下が少ない。
- ③腐食厚が 30%を超えるまでは、腐食幅が 6 度の方が 180 度より耐荷力が小さくなる。

腐食による減厚が無い場合の管の抵抗曲げモーメントを 1.0 として求めた抵抗曲げモーメント比とひび割れ荷重比の関係を図 11 に示した。開削工法の場合は、1.25 の安全率を用いているので、管の抵抗曲げモーメント比が 0.8 を下回ると、設計上の余裕が無くなる。

φ250mm では、管頂部が 10 度(約 20mm)までの幅で管厚の 5%(1.4mm)の腐食、φ2,400mm

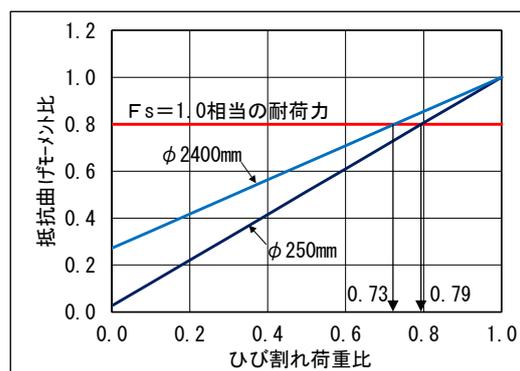


図 11 抵抗曲げモーメント比とひび割れ荷重比

の幅で管厚の 30%(約 53mm)の腐食があれば管の抵抗曲げモーメント比が 0.8 を下回ることになる。安全率ぎりぎり設計されている管の場合は、上記の腐食状態になると管にひび割れが発生する恐れがあるため、腐食対策の検討が必要になる。

最後に、FEM解析に当り、名古屋工業大学のインターンシップ生の室井規也君には多大な手助けをいただいたことをここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 飯嶋 隆之、中根 進 長寿命化に向けた腐食管耐荷力の推定と評価 一般社団法人 全国上下水道コンサルタント協会 平成 25 年度 技術報告集(第 28 号) 平成 26 年 3 月
- 2) (社)日本水道協会 下水道管路施設腐食対策の手引き(案)平成 14 年 5 月 p. 1
- 3) (財)下水道事業支援センター 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 平成 24 年 4 月 p. 14
- 4) (社)日本水道協会 下水道用鉄筋コンクリート管 JSWAS A-1-2003