

下水道管腐食現象の変位解析に関する研究

大木 宜章 (土木工学科) 石田 哲朗 (東洋大学)
朱 偉 (河海大学)

はじめに

本年度主題に沿って実験解明した下記の3テーマについてその概要を記載する。

1. 下水道管腐食現象の変位解析
2. 長江・川辺湿地の生物特性および水質浄化効果
3. 簡便な原位置浸潤試験装置による地盤の不飽和浸透特性の推定

1. 下水道管腐食現象の変位解析

鉄とコンクリートで構成されている下水道施設は、他の構造物と比し非常に厳しい環境にあり、このため耐用年数に達しないコンクリート構造物が早期老朽化する報告がされている、このため早期老朽化のメカニズムの早期解明が重要な課題となっている。

下水道管の腐食は天井・吃水・水中部の3種類に分類され、要因は更に下記のA~Dの4種類に分類される。

(a) 天井部

・要因 A：下水道内に存在する H_2S (硫化水素) が濃縮された結露内に生息する硫酸化細菌が生成する H_2SO_4 (硫酸) による腐食

・要因 B：下水道内に存在する CO_2 (二酸化炭素) によって中性化されたコンクリート表面に生息する硫酸化細菌が生成する H_2SO_4 による腐食および下水中に含まれる有機酸、硫酸化細菌が生成する H_2SO_4 による腐食素) によって中性化されたコンクリート表面に生息する硫酸化細菌が生成する H_2SO_4 による腐食

(b) 吃水部

・要因 C：水の挙動による侵食および下

表 1 Experimental conditions

	中性化方法	中性化深さ	浸漬溶液
供試体A	未中性化	0mm	H_2SO_4
供試体B	CO_2 により 中性化	2mm	H_2SO_4
供試体C	人工下水により 中性化	2mm	H_2SO_4
供試体D	未中性化	0mm	人工下水

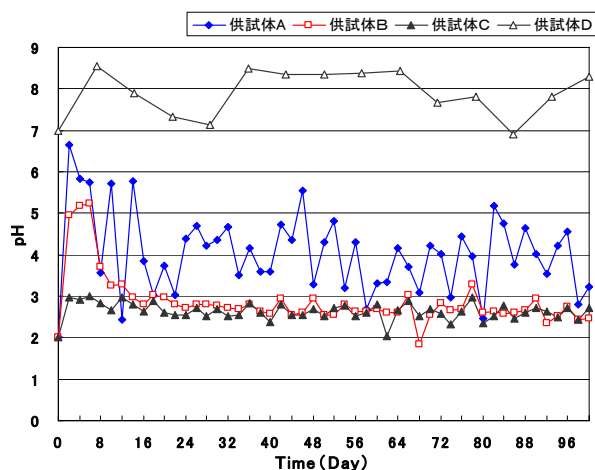


図 2 pH の経日変化

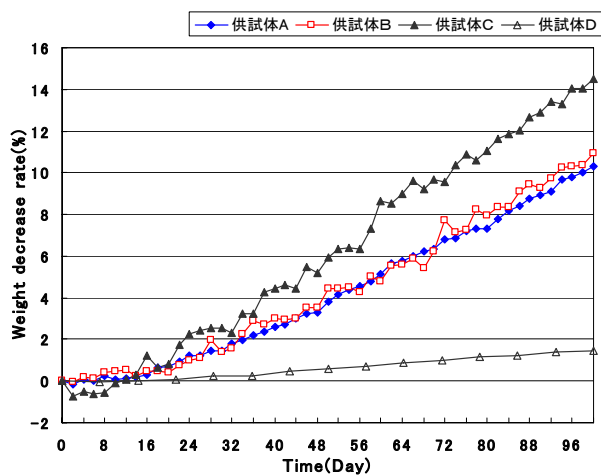


図 3 供試体重量減少率

水中に含まれる有機酸、硫酸化細菌が生成する H_2SO_4 による腐食

(c) 水中部

・要因 D: 下水に含まれる有機酸による腐食

図 2 に浸漬溶液の pH の変化を示す。まず中性化深さ 0mm である供試体 A は初期の段階で pH の大幅な上昇後、起伏を繰り返しながら収束、減少していくことから、 H_2SO_4 の影響により $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (二水石膏) および、 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ (エトリンガイト) の生成を行い、コンクリート表面から硫酸イオンの解離にともないカルシウム分の溶出が起きていると考えられる。なお、供試体 D は供試体 A と同様に中性化深さ 0mm であるが浸漬溶液である人工下水は H_2SO_4 と比し弱酸性であるため他の供試体の様なカルシウム分の溶出が少なく pH に大きな変化は見られなかった。

○供試体重量の変化

供試体重量の変化を図 3 に示す。図上では確認しづらいが、各供試体において実験初期段階に重量の微量増加が見られた。これはコンクリートの主成分である $Ca(OH)_2$ 等と H_2SO_4 の反応によって生成された、二水石膏および、エトリンガイト等の影響であるといえる。

供試体体積の変化を図 4 に示す。供試体 A・B・C において起伏の激しい図となっている。これは、コンクリート中のカルシウム分と H_2SO_4 の反応により生成されるエトリンガイト等の影響と考えられる。すなわちエトリンガイトは結晶中に多く水を取り込む膨張性物質であるが、非常に崩壊性が高い物質である。エトリンガイトは崩壊に伴い硫酸イオンを解離するため、硫酸イオンはさらにコンクリート内部へ浸透し、結晶を生成する。供試体 A は未中性化のため、 H_2SO_4 の浸透→結晶物の生成→膨張・崩壊のサイクルを繰り返すことで内部に

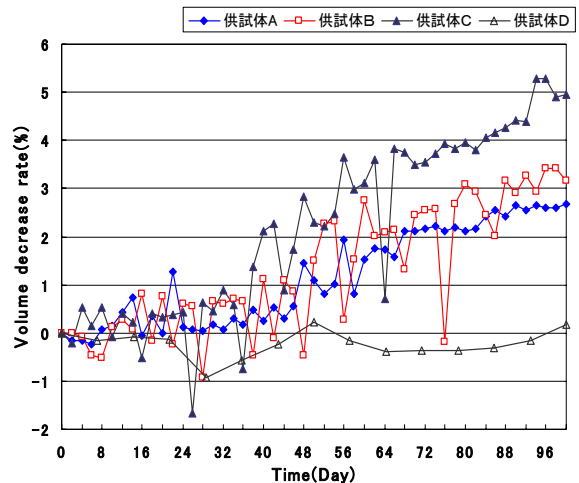


図 4 供試体体積減少率

腐食が進行している。一方、 CO_2 、人工下水によって中性化した供試体 B・C では健全なコンクリートの pH が 13 であるのに対して供試体 B は 8.8、供試体 C は 7.6 となっており、エトリンガイトの膨張率、崩壊率は pH が低い環境において上昇することから供試体 A と比較して、より起伏の激しい図となっている。また供試体 D においても有機酸による腐食の影響を受けているものの重量・体積においてその影響は微々たるものに留まっている。

○形状比較図より供試体体積の変化 (高精度レーザー分析による)

1 年間という期間において以下の実験式を導いた。

$$\text{供試体 A} : y = 0.0636x - 09$$

$$\text{供試体 B} : y = 047x - 0.6366$$

$$\text{供試体 C} : y = 0.1162x - 0.8564$$

$$\text{供試体 D} : y = 0.0053x - 0.2697$$

この実験式より 1 年後の体積減少率を算出すると、供試体 A=23%、供試体 B=27%、供試体 C=42%、供試体 D=1.7% となった。しかし、実際には硫酸化細菌が生成する H_2SO_4 と人工的に pH を調整して作成された硫酸水溶液では相異が生じられると考えられる。

これらの結果から以下の結論を得た。

①人工下水と二酸化炭素による中性化では同じ中性化深さでもコンクリートの

pH には差異がある。このことは酢酸カルシウムが易溶なのに対して炭酸カルシウムはコンクリートの細孔を塞いでしまい、水酸化カルシウムの溶出を阻害してしまうからだと考えられる。

- ② 同じ中性化深さでも中性化の方法により、アルカリ分の溶出速度、硫酸による腐食の進行速度は異なり、人工下水による中性化の方が硫酸による腐食の進行速度は速い。このことは通常の下水道管において吃水部における腐食が著しいことと一致しており、有機酸によるコンクリートの中性化が硫酸腐食の進行に対して大きく影響していることがいえる。
- ③ 下水中に含まれる有機酸のみによる腐食ではコンクリートの腐食の進行速度は非常に緩やかであり、下水道管での腐食現象には硫酸による影響が大きいことがいえる。

硫黄酸化細菌が生成する硫酸の作用によりコンクリート表層面ではエトリンガイトが生成されエトリンガイトの膨いく。またコンクリートが中性化されることによりエトリンガイトの生成および内部への腐食の進行が容易になり腐食の進行速度が早くなるものと考えられる。

2. 長江・川辺湿地の生物特性および水質浄化効果

長江下流の鎮江市に位置する(図5)川辺湿地を対象に、湿地植生調査及び水質浄化実験を行った。湿地植生種類が地形および河川水位変化との関係を明らかにすること、湿地システムが河川水質に与える影響を評価することが研究目的であった。

湿地システムが長江の水質にどれだけの影響を与えるか、浄化能力をどの程度で評価できるかについて湿地モデルを構築して実験を行った。実験モデルが図5のように1.43m×5.0mの実験湿地を2つを作った。現場の底泥を敷き、*Phragmites communis*

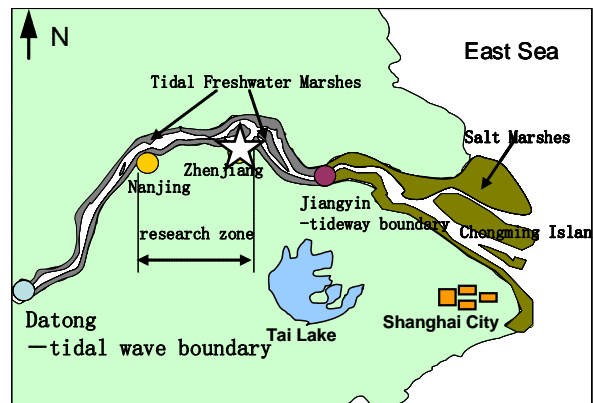


図5 長江下流における鎮江の位置

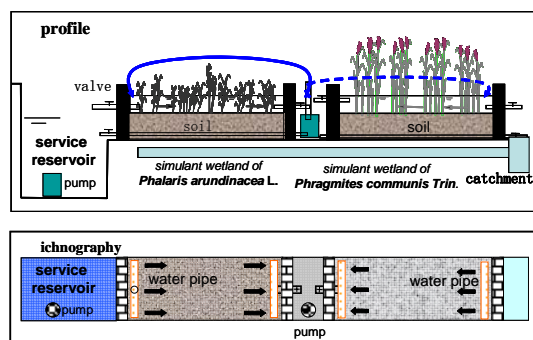


図6 水質浄化実験装置

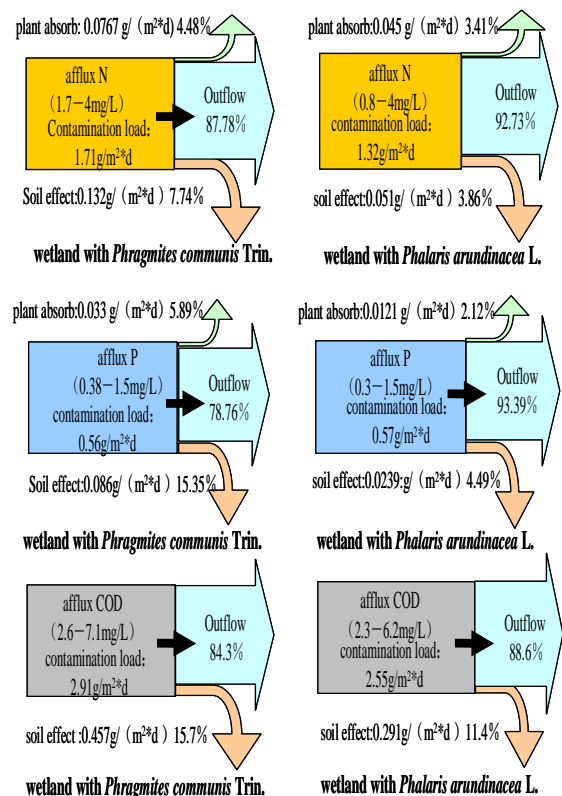


図7 水質浄化効果

trin(葦)と *Phalaris arundinacea L.* を実験植生と用いた。この場所に流れ込む都市

河川の水質を基準に実験用水を調製し湿地に水を流し、水質の変化を測定した。また、汚染物の行方を追うために、植物の生物量の変化および栄養分の含有量も測定した。模型実験の結果を図6に示す。植生の異なるにも関わらず、TN、TP、CODの浄化効果に大差がない。TN、CODに対して浄化率が12~15%程度になるが、TPの浄化効果がやや低く6~10%程度にとどまった。浄化されたものが植物吸収した分、底泥に沈積した分、そして根元微生物によって分解されたものになる。植生吸収した分が浄化量の2~6%になって、生物量の大きい葦が吸収量が比較的多い。ただし、汚濁SSが植生によって底泥へとどめ、水から底泥に転化したものが多い。これらの分の一部が根元微生物によって分解されるが、一部分が底泥に蓄積される。根元微生物によって分解される量について今回のところ計測できていないため実際の量が把握していない。

これらの実験から以下の知見を得た。現場調査および模型実験を行った結果、長江・川辺湿地の植物が水位変化のリズムに大きく影響され、自然選択に残された物種しか繁殖できない。湿地が水質にある程度の浄化効果を持つものの、システムから除外するには植生の刈り取ることが重要である。また根元微生物の活性が浄化率に重要な影響を与える。

3. 簡便な原位置浸潤試験装置による地盤の不飽和浸透特性の推定

河川堤防のような土構造物内の湿潤状況は時間の経過とともに、刻々と変化するもので、飽和領域と不飽和領域との境界には複雑な水分挙動が生じている。これらの挙動を予測、再現する方法として飽和・不飽和浸透流解析が用いられる。この解析手法の要となる土中水の浸透定数は、水分特性曲線のパラメータ θ_s 、 θ_r 、 α と n と透水

係数 $k(\cdot)$ であるが、計測方法は煩雑で時間もかかる。

そこで、Gribb¹⁾やKodešováら²⁾の研究に基づいた、測定が簡単で、装置構造もシンプルな地盤の原位置浸潤試験装置を試作してみた。これにより地盤の不飽和水分特性を容易に推定できれば、上記のような広範囲の大掛かり調査は簡便化できる。本報では、この試験法を説明し、その実務性を調べた結果から今後の展開方向を述べる。

図7に試験装置図を示す。コーンパーミアメータ(Cone Permeameter)は直径30mmの中空円筒で、長さは115cmである。最も質量のある給水タンクの容量は10ℓで、大人二人いれば簡単に移動でき、一人でも搬入は可能である。なお、計測箇所への搬入を容易にするために、計測機器を配置する架台は分解できる。

図8には地盤中に挿入するコーンパーミアメータの構造図を示す。上部、下部の受感部のセラミックリングには、それぞれ二本のフレキシブルチューブが埋め込まれて圧力センサとつながっているだけの簡単な装置である。先端付近の流出部には孔が開けてあり、ここから地盤内に給水される。

試験方法は、必要な深度までオーガで削孔し、コーンパーミアメータを挿入する。給水用チューブとファイバートューブをコーンパーミアメータの上部の中空部分に入れる。給水を開始すると、コーンパーミアメータに水位が形成されていき、水面がファイバートューブに触れると給水が停止するので、一定の水位が保たれ浸潤していく。このときの浸透水量と2カ所の圧力センサの値の変化を所定の時間間隔で記録する。地盤の透水性にもよるが、一カ所当たり20~30分程度で計測は終了する。

Šimůnekら³⁾による地盤内の不飽和浸透流の解析プログラム(Hydrus-2D)が安価で

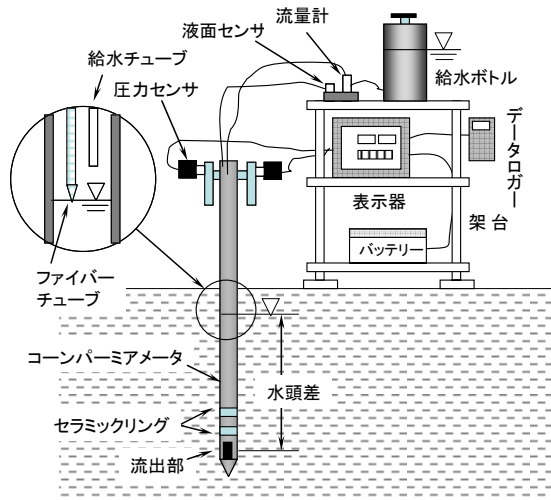


図8 試験装置の概略図

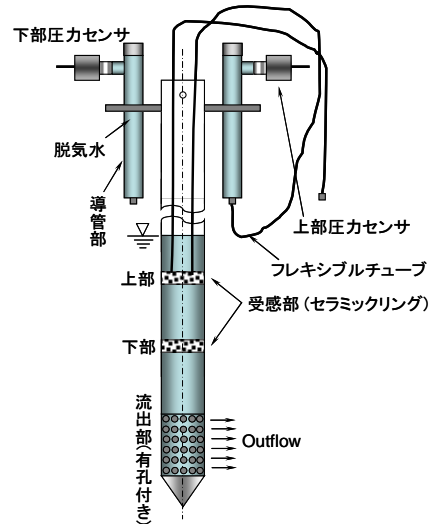


図9 コーンパーミアメータの構造

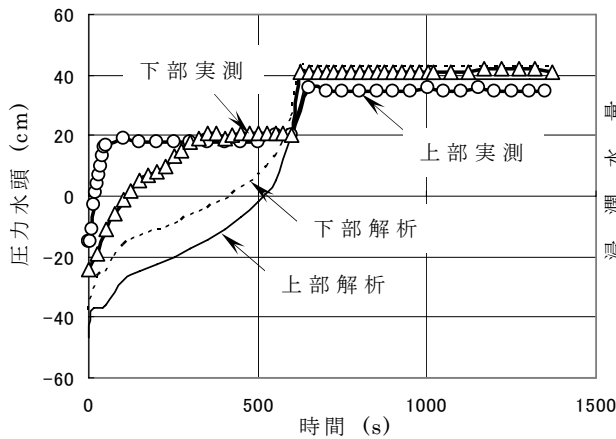


図10 圧力水頭の変化に対する実測値と解析値の比較

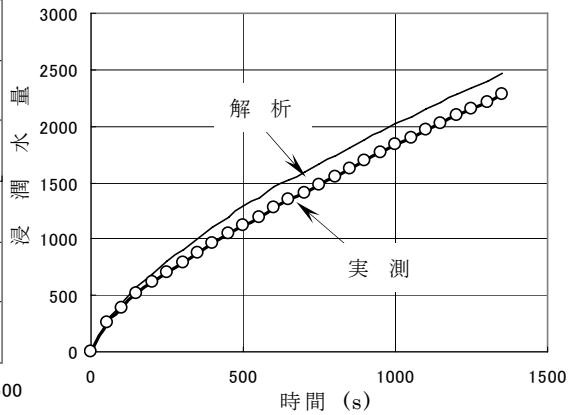


図11 浸潤水量に対する実測値と解析値の比較

汎用性もあると思われるので使用した。このプログラムの軸対称問題の基本的な支配方程式は Richards による次式であり、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rk \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

ここに、 r, z はそれぞれ半径、鉛直方向の座標、 t は時間、 h は圧力水頭、 k は透水係数、 θ は体積含水率である。また、計測した浸潤水量と地盤の圧力水頭との関係を近似するために用いる水分特性曲線は、式(2)の van Genuchten モデルを採用し、飽和透水係数 k_s と水分特性曲線のパラメータ $\theta_s, \theta_r, \alpha$ と n を初期推定値として導入し、反復計算させて逆解析する。

$$S_e = \left(1 + |\alpha h|^n \right)^{-m} \quad (2)$$

ここで、 S_e は有効体積含水率で、 n は先のパラメータと異なり、 m とともに次の関係式で表されるフィティングパラメータである ($m=1-n^{-1}$)。

実務的検証結果と考察

調査地点は地表から 6.0 m まで関東ロームで覆われており、その下に疑灰質粘土の薄層が存在する。地下水面は地表から 4.8 m のところにあり、 N 値 4 程度の地盤である。オーガによる削孔は 40 cm とした。図 9 と図 10 に実測値と逆解析値の一例を示した。実測値の圧力水頭の変化を精確に再現することはできなかったが、浸潤水量の変化と合わせて、計測地点の不飽和土の浸透特性を近似した結果と判断する。このと

きの水分特性パラメータは、 $\theta_s=0.75$, $\theta_r=0.50$, $\theta=0.030$, $n=2.01$, $k_s=1.6 \times 10^{-3}$ cm/s であった。また、室内実験から得られた同地点のサンプリング試料の水分特性パラメータは、 $\theta_s=0.77$, $\theta_r=0.42$, $\theta=0.034$, $n=1.75$, $k_s=2.8 \times 10^{-3}$ cm/s であり、短時間の計測時間で推定された値としては十分に実用性のある結果と思われる。なお、よい解析結果を得るために解析上の熟練度が必要では、標準的な試験方法にはなり得ないと考えているので、解析は一計測に対して数回に止めた。この点を踏まえて各種の土質材料に対して検証を進めたい

参考文献

1 について

- 1) 小林一輔, コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断, 森北出版 (1991)
- 2) 山中健生, 独立栄養細菌の生化学, アイピーシー (1999)
- 3) 高橋久, わかりやすい下水道管きよの実際
- 4) 水上国男, コンクリート構造物の耐久性シリーズ「化学的腐食」, 技報堂出版 (1986)
- 5) 山田順治, わかりやすいセメントとコンクリートの知識, 鹿島出版会 (1983)
- 6) 上木勝司, 嫌気微生物学, 養賢堂 (1993)
- 7) 横山博一, 下水道管路の再構築, 理工図書 (1999)
- 8) 平野陽三, 上下水道機材実務要覧 下水道編, 産業調査会 (1993)
- 9) 三品文雄, さらに詳しい下水道腐食対策講座, 環境新聞社 (2003)
- 10) 田中修司, 下水道管渠学, 環境新聞社 (2001)
- 11) 岸谷孝一, コンクリート構造物の耐久性シリーズ「中性化」, 技報堂出版 (1986)
- 12) 十河茂幸, コンクリートのひび割れがわか

る本, セメントジャーナル社 (2003)

- 13) 土木学会, コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題, 土木学会 (2003)

- 14) 株式会社キーエンス H P

<http://www.keyence.co.jp/>

2 について

- 1) Andrew H. Baldwin, Restoring complex vegetation in urban settings: The case of tidal freshwater marshes. *Urban Ecosystems*, (2004)7, p.125-137.
- 2) Booth.R.K, Rich.F.J et al., Evolution of a freshwater barrier-island marsh in coastal Georgia,USA.*Wetlands*,(1999) 19,p.570-577.
- 3) Jennifer L, Morse J. Patrick ,Megonigal, Markr, Walbridge, Sediment nutrient accumulation and nutrient availability in tidal freshwater marshes [J].*Biogeochemistry*, (2004) , p. 1-32.

3 について

- 1) Gribb, M.M., Parameter estimation for determining hydraulic properties of a fine sand from transient flow measurements, *Water Resour. Res.*, 32 (7), (1996), pp. 1965-1974.
- 2) Kodešová, R., Gribb, M.M., and Šimůnek, J., A new CPT method for estimating soil hydraulic properties, *Geotechnical Site Characterization*, Balkema, (1998), pp.1421-1425.
- 3) Šimůnek, J., Sejna, M. and van Genuchten, M. Th., *HYDRUS-2D, Simulation Water Flow and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media*, IGMC, Colorado School of Mines, (1996). [March 9th, '07, NU BIOTECH.RC.]

