

経年劣化により管路断面が腐食減厚した上水道管路の確率的リスク解析に基づく
地震リスクマネジメント手法によるライフサイクルコストの時系列分析に関する研究
Time Series Analysis of Life Cycle Cost by Seismic Risk Management Based on Probabilistic Risk
Analysis for Water Supply Pipeline Corroded and Reduced in Thickness by Degradation over Time

常井 友也^{*}
Tomoya Tsunei

(連絡先・HP : <https://article-notice.wixsite.com/rules>)

1. はじめに

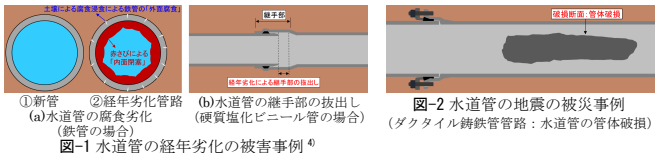
近年、上下水道・都市ガス施設等のライフライン施設においては、耐用年数 50 年（上水道管路の耐用年数：40 年）を超えた施設が存在しており、「経年劣化」による耐力低下が懸念されていることから、耐震化事業、長寿命化事業が実施されている。上下水道システムにおける上水道管路の経年劣化の被害例としては、図-1 に示すように、土壌による腐食浸食による鉄管の「外面腐食（腐食減厚）」、赤さびによる「内面閉塞」、経年劣化による「継手部の抜出し（漏水原因）」などが生じている。

参考文献²⁾では、「災害リスクの情報³⁾」として、ライフライン構造物に潜在する地震時の被害特性を定量的に評価できる「地震リスク」を用いて、ライフライン管路の中でも上下水道システムにおける下水道管路施設を取り上げ、劣化予測式を基に「経年劣化」の現象を再現し、「管路の継手構造部」が経年劣化した場合を対象として、地震時予測損失に関する分析が実施されている。

本研究では、ライフライン管路の中でも、上下水道システムにおける上水道管路を取り上げ、地震時の被害特性を定量的に評価できる確率的リスク解析（構造信頼性設計）に基づく地震リスクマネジメント手法を用いて、「経年劣化」した上水道管路を対象に、経過年数ごとに地震時予測損失の時系列分析を実施し、上水道管路の耐震安全性評価として、「災害リスクの情報³⁾」の定量的評価を行うことを目的とする。確率的リスク解析は、信頼性解析、安全性解析で用いられている分析手法である。本研究では「地震損害保険」に適用可能な「推定損害額の評価手法」として、確率的リスク解析を用いて、リスク分析を行う。

過去の地震の被災事例として、2018 年に発生した大阪府北部地震において被災した上水道管路（ダクタイル鋳鉄管管路：布設から 55 年程度経過）は、上水道管路の管体に破断が生じる「管体破断（図-2）」により漏水が生じており、外面腐食による経年劣化により、管路断面が腐食減厚（最大で腐食深さ 5.7mm）していたことが判明している。そのため、本研究では、上水道管路の経年劣化の現象を、「土壌による腐食浸食による鉄管の外面腐食（腐食減厚）」とし、「腐食予測式（予測腐食深さ）」を基に、「経年劣化による腐食減厚」による耐力低下の現象の再現を実施する。

そして、さらに、一般的に企業における経営費用の中で最も大きいのは、人件費であるが、施設管理費も人件費に次ぐ固定費となっている。そのため、「上下水道事業（ライフライン事業）の事業経営」として、「経営工学・金融工学」、及び上下水道システム（ライフライン構造物）の「施設情報管理」の観点から、「経過年数」ごとに地震時損失コストを考慮したライフサイクルコスト分析（ライフサイクルコスト LCC：一般的には、構造物がつくられてから、その維持管理、最終的な解体・廃棄までに要する費用の総額）の時系列分析を実施し、上下水道事業（ライフライン事業）の「経営の健全性の向上」の観点から、上下水道管路（ライフライン管路）のライフサイクルにおいて生じる費用の構成を把握することを目的とする。



2. 確率的リスク解析（構造信頼性設計）に基づく地震リスクマネジメント手法と上水道管路のライフサイクルコスト分析

本研究においては、地震リスクを発生確率と損失額の積である「期待値」として取り扱い、地震リスク分析を実施する。したがって、地震リスクは、式(1)のように定義することができる。

$$R = \sum P \times C \quad (1)$$

ここで、 R は地震リスク（期待値）、 P は発生確率、 C は損失額を表す。

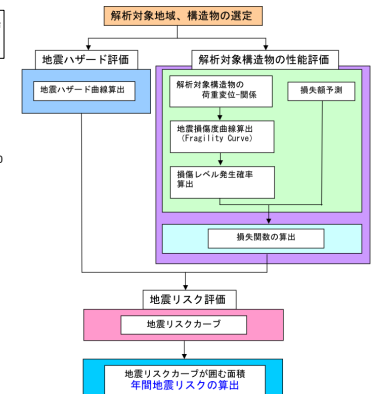
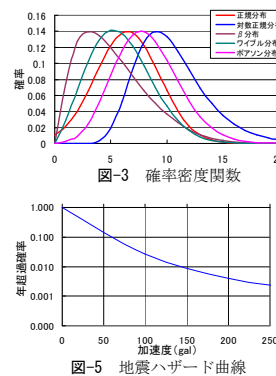
^{*}常井技術士事務所 Tsunei Professional Engineering Office

確率的リスク解析（構造信頼性設計）において使用される確率関数の「数理モデル」として、正規分布、対数正規分布、 β 分布、ワイブル分布、ポアソン分布等（図-3）が考えられるが、本研究で使用する確率関数の「数理モデル」は対数正規分布とした。次に、本研究では、確率的リスク解析手法として、図-4 に示すような地震リスクマネジメントの算出フローに従って、地震リスクマネジメントを行う。図-5 に解析対象地域における水平最大加速度と年超過確率の関係を表す地震ハザード曲線を示す。

さらに、本研究では、「災害リスクの情報³⁾」を定量的に把握するために、式(2)が示すように、イニシャルコスト $C_{initial}$ として「初期建設費用」、ランニングコスト $C_{running}$ として「維持管理費用」の中でも「地震時損失コスト（「地震リスク」）」を評価項目としたライフサイクルコスト(LCC)分析を実施する。なお、地震時損失コストに関しては、現在価値法を用いて、式(3)に示すように社会的割引率 r を考慮し、 $r=4\%$ ⁵⁾として、ライフサイクルコスト LCC の改善を行った。

$$LCC = C_{initial} + R(t) \quad (2) \quad PV = P_t \times \frac{1}{(1+r)^t} \quad (3)$$

ここで、 $C_{initial}$ は上水道管路の初期建設費用、 R は地震リスク、 PV は t 年後の補修補強費用等の現在価値、 P_t は t 年後の補修補強費用等の将来価値、 r は社会的割引率を表す。

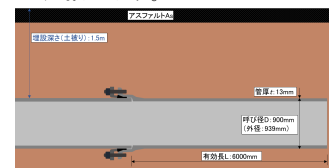
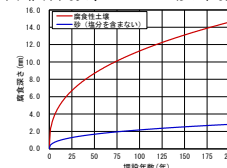


3. 経年劣化した上水道管路の解析対象モデル

上水道管路の解析対象モデルは、埋設深さ（土被り）1.5m のダクタイル鋳鉄管管路 2 種管 K 形 $\phi 900$ mm（延長 6.0m、管厚 $t=13$ mm）とし、埋設地盤の性状は「腐食性土壌」と「砂（塩分を含まない）」の 2 種類の地盤を想定し、分析を行った。さらに「土壌による腐食浸食による鉄管の外面腐食」が起因する経年劣化現象に関しては、「経過年数と腐食深さ」を示す「予測腐食深さ（腐食減厚）」の「腐食予測式」は、参考文献^{4),6)}を参考に、式(4)（図-6）のように決定した。

$$Y = k \times t^\alpha \quad (4)$$

ここで、 Y は管外面腐食深さ予測値(mm)、 k は埋設環境の腐食性評価係数、 t は埋設年数(年)、 α は定数を示す。



4. 経年劣化した上水道管路の耐震性能評価

本研究では、上水道管路の耐震性能評価としては、「管路に生

「管体応力(軸方向応力)」を照査項目とした。地震動の影響による「管体応力(軸方向応力)」の算出においては、道路橋示方書・同解説⁸⁾を基に、耐震設計上の地盤種別、減衰定数、及びレベル2地震動(図-8)を基として、その最大速度振幅を50~1500(gal)に基準化し、作成した地震動を用いて、地震波速度応答スペクトル解析(図-9)を実施し、式(5)に示すように、地盤を1自由度系に置き換えて解析を行うことで地震時の地盤水平変位を算出し、式(6)から「管体応力(軸方向応力)」の算出を行った。さらに、「管体応力(軸方向応力)」と地盤最大加速度の関係を整理すると、上水道管路の管体応力と地震加速度の関係(耐力曲線)は、図-10のようになる。本研究では、ダクタイル鑄鉄の耐力である「許容応力 σ_a 」を270,000(N/mm²)とし、式(7)が示すように「軸方向応力の合計値 σ 」が「許容応力 σ_a 」を超えると、管体破損が生じる。なお、ダクタイル鑄鉄は、参考文献⁹⁾より、「管体の引張強さや伸びなど材質が長期間使用しても変化しない」という機械的性質を有していることから、弾性係数 E 、許容応力 σ_a は、上水道管路の耐震診断において経年変化しないと仮定する。また、本研究においては、管厚計算を対象外とし、腐食減厚が管路断面に一樣に生じると想定する。

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi} S_V T_s \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (5) \quad \sigma = \sigma_{pi} + \sigma_{po} + \sigma'_x \quad (6) \quad \sigma \geq \sigma_a \quad (7)$$

ここで、 $U_h(z)$ は地震時応答変位(m)、 z は地表面からの深さ(m)、 S_V は設計応答速度(m/s)、 T_s は表層地盤の固有周期(s)、 H は表層地盤厚(m)、 σ は軸方向応力の合計値(N/mm²)、 σ_{pi} は常時荷重として上水道管路内の設計内圧(N/mm²)、 σ_{po} は常時荷重として自動車荷重(N/mm²)、 σ'_x は地震荷重による軸方向応力(N/mm²)、 σ_a は許容応力(N/mm²)を表す。

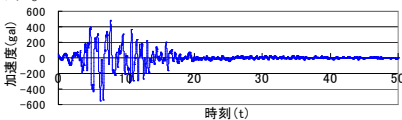


図-8 入力地震動⁸⁾

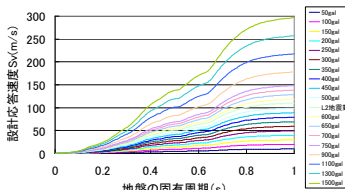


図-9 地震波速度応答スペクトル

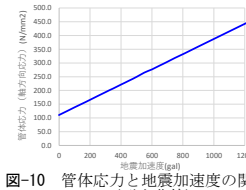


図-10 管体応力と地震加速度の関係(耐力曲線)(埋設年数t=100年の場合)

5. 経年劣化した上水道管路の地震損失コスト評価

本研究では、「物理的損失」、「機能不全による営業損失」、「ユーザー損失」の3つの地震損失コストを考慮する。物理的損失は、上水道管路の復旧コスト、つまり補修費、調査費用を評価対象とし、参考文献^{2), 5), 7)}を参考に被害区分と補修方法を表-1に示すように設定した。機能不全による営業損失は水道管が地震により被災することで、水道管の機能不全により公営企業が得ることができなくなった営業収入、つまり水道使用料金収入とする。ユーザー損失は水道管が地震により被災することで、水道施設の利用者(ユーザー)が水道を利用できなくなったことにより生じる経済損失とする。上水道管路の管路設計において、流量計算は、最大流速を3.0m/s以下と設定し、ヘーゼン・ウィリアムズ公式⁴⁾により算出を行った。本研究では、時間変動等により差異が生じるが、送水管からの送水量を配水量と仮定し、給水計画(計画給水人口の算出)を行った。なお、1人1日使用量は、専用住宅の平均的な使用実績を使用した。計画給水区域においては、1戸当たり4人とした。初期建設費用、各地震損失コストに関しては、参考文献^{2), 4)}等の値を参考に算出を行った。

表-1 水道管ダクタイル鑄鉄管管径φ900mmの被害区分と補修方法^{2), 4), 5), 7)}

被害ランク	水質劣化しての程度	補修方法	営業損失	ユーザー損失	管体応力による物理的損傷	管体応力による営業損失	管体応力によるユーザー損失	補修費用	営業損失	ユーザー損失	物理的損失
①(軽微)	水質劣化なし	補修なし	-	-	管体応力が許容応力(ダクタイル鑄鉄の耐力)の1/2以下(管体応力に対して、物理的損傷が軽微な状態)	0	0	0	0	0	0
②(中程度)	水質劣化して	閉鎖工事(補修)	-	-	管体応力が許容応力(ダクタイル鑄鉄の耐力)の1/2以上(管体応力に対して、物理的損傷が中等な状態)	0	0	0	0	0	0
③(重大)	水質劣化して	閉鎖工事(補修)	○	○	管体応力が許容応力(ダクタイル鑄鉄の耐力)を超える場合	0	0	0	0	0	0

6. 確率論的リスク解析(構造信頼性設計)に基づく上水道管路の地震リスク分析

本研究で評価する地震リスクは、地震リスクカーブが年超過確率と損失額の囲む面積で表される「年間地震リスク(図-11)」を評価指標とする。図-12は、上水道管路の地震リスクカーブを示したものである。図-13、図-14は、それぞれ「腐食性土壌」、「砂(塩分を含まない)」に関する地震損失コストを考慮した上

水道管路のライフサイクルコスト(LCC)分析の時系列分析の結果である。

本研究のモデルでは、「腐食性土壌」に埋設された上水道管路の場合、図-13、図-15より埋設年数115年を経過すると、地震損失コストを考慮したライフサイクルコスト(LCC)が急増することから、上水道管路の耐震性能が低下し始める結果となった。

また、「砂(塩分を含まない)」に埋設された上水道管路の場合、図-6(式(4))より、腐食進行が軽微であるため、腐食深さ(mm)が少なく、図-14に示すように埋設年数200年を経過したとしても、地震時損失コストの大幅な増加は見られず、初期建設費に対する地震損失コストの比率は軽微なものとなった。地震時損失コストを考慮したライフサイクルコスト(LCC)は、ほぼ一定値となり、上水道管路は耐震性能を有している結果となった。

一方で、大阪府北部地震で被災した上水道管路(ダクタイル鑄鉄管管路)の破損に、直接的に影響したかどうかは、詳細な分析が必要となるが、参考文献⁹⁾には、被災した上水道管路は、現在の製造方法とは異なり、昭和40年以前の管路の製造方法で製造されていたことにより、「引張強度が当時の規格値以下」となっている箇所が存在していることが明記されている。ダクタイル鑄鉄は、参考文献⁹⁾より、「管体の引張強さや伸びなど材質が長期間使用しても変化しない」という機械的性質を踏まえると、「施工管理における品質管理不足(施工管理不足)」の可能性が推測される。そのため、工場検査・現場立会などによる管材の品質管理、及び施工管理を十分に行う必要があると考えられる。

今後、上水道管路の耐震化計画においては、ダクタイル鑄鉄管の実使用年数⁴⁾(60~80年)を踏まえた上で、「管体応力(軸方向応力)」を照査項目とした場合、上水道管路が「腐食性土壌」に埋設されているケースでは、「確率論的リスク解析」、及び「耐震構造設計」の観点から埋設年数115年前後を目処に、耐震化を推進し、耐震性の確保を図ることで、ライフサイクルコスト(LCC)及び地震時の損失を低減することが可能となる。

本研究から、確率論的リスク解析(構造信頼性設計)に基づく地震リスクマネジメント手法により、上水道管路の「災害リスクの情報³⁾」を定量的に評価することができた。

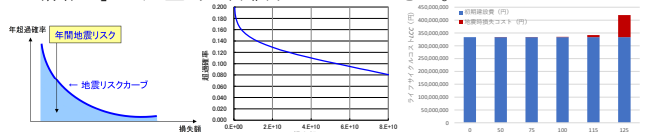


図-11 年間地震リスク

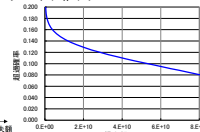


図-12 地震リスクカーブ

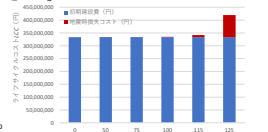


図-13 ライフサイクルコストLCC分析結果(腐食性土壌)

図-11 年間地震リスク 図-12 地震リスクカーブ 図-13 ライフサイクルコストLCC分析結果(腐食性土壌)

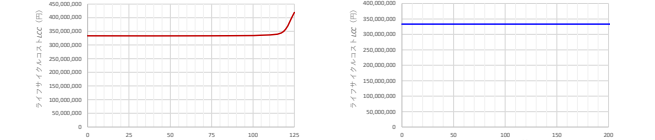


図-14 ライフサイクルコストLCC分析結果(砂:塩分を含まない)

7. 最後に

本研究は、当方が個人研究で行ったものです。当方、及び本論文等に関しては、「当方、及び論文等に関する留意事項¹⁾(<https://article-notice.wixsite.com/rules>)」、及び下記の注釈の承認を行って下さい。

注 当方は、「出身大学・大学院の指導教員等、その他(関係者等、上記教員が所属する土木学会地震工学委員会)」、「過去の勤務先・所属等」、「その他」とは一切関係ありません。(講演発表会等に際し、「研究室内の准教授、秘書、教員関係者の娘等」との「縁談」、「宗教勧誘(創備学会・カルト宗教)」等の「迷惑行為」が生じることは断固お断りです。)当方、及び本論文等に関して、出身大学・大学院の指導教員等、上記等、その他への連絡、問い合わせ、その他等は、上記等、及びHPに記載している「迷惑行為」が生じる可能性があるため、一切行わないで下さい。当方、及び論文等に関する連絡、問い合わせ等は論文に記載しているメールフォームに行ってください。また、上記等、その他からの「連絡、問い合わせ、関与、その他等」はお断りです。当方は、「宗教勧誘」、「創備学会、カルト宗教等」は、断固お断りです。本論文等に関して、「上記人物等(当方のHPに記載した人物)」、「創備学会、カルト宗教等」、「上記人物に賛同する人物等」からの「質疑応答、連絡、関与、その他等」は断固お断りです。(「当方、及び論文等に関する留意事項¹⁾:<https://article-notice.wixsite.com/rules>」)

参考文献

[1] 常井友也:「当方、及び論文等に関する留意事項」,
<https://article-notice.wixsite.com/rules>, 2023年3月29日閲覧
[2] 常井友也:地震リスク評価手法を用いた経年劣化した地盤埋設パイプラインの地震時損失の時系列分析に関する研究,土木学会全国大会第76回年次学術講演会, III-319, 2021.9
[3] 内閣府HP: <https://www.cao.go.jp>, 2023年3月29日閲覧
[4] 厚生労働省HP: <https://www.mhlw.go.jp>, 2023年3月29日閲覧
[5] 国土交通省HP:「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」, 2023年3月29日閲覧
[6] 日本ダクタイル鉄管協会HP: <https://www.jdpa.gr.jp>, 2023年3月29日閲覧
[7] (社)日本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説2022年版
[8] (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2017年
[9] 大阪広域水道企業団HP: <https://www.wsa-osaka.jp>, 2023年3月29日閲覧