

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る 上水道管路の災害リスク情報の定量的評価に関する研究

常井 友也[†]

常井技術士事務所[†]

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

1. はじめに

近年、上下水道施設等のライフライン施設においては、「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。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(上下水道システム：下水道管路施設)を取り上げ、地震時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、上水道管路を取り上げ、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、地震時の被害特性を定量的に評価できる「地震リスク」を用いて地震時予測損失の分析を実施し、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。地震時損失を考慮したライフサイクルコスト分析を実施し、上水道管路のライフサイクルにおいて生じる費用の構成の把握を行う。

2. 構造信頼性設計に基づく地震リスクマネジメント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。

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

ここで、 R は期待損失、 P は発生確率、 C は損失額を表す。

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-1)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、図-2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-3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、「初期建設費用」、「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、 $r=4\%$ ⁴⁾として、ライフサイクルコストLCCの改善を行った。また、本研究では、ライフサイクルコスト(LCC)分析の評価期間 n を50年とした。

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

ここで、 $C_{initial}$ は上水道管路の初期建設費用、 R は年間地震リスク、 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。

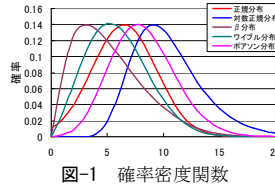


図-1 確率密度関数

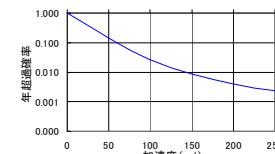


図-3 地震ハザード曲線

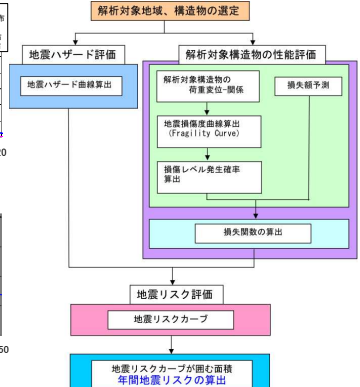


図-2 構造信頼性設計に基づく地震リスクマネジメントの評価フロー

3. 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、土被り1.0mの水道用硬質塩化ビニール管RR管φ50mm(延長5.0m)を解析対象モデルとした。

4. 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、「地震動による縦断方向の継ぎ手部の抜出し長」を照査項目とした。地震動の影響による継ぎ手部の抜出し長⁵⁾の算出においては、道路橋示方書・同解説⁶⁾を基に、耐震設計上の地盤種別、

Quantitative Evaluation of Disaster Risk Information for Water Pipeline by Seismic Risk Management Based on Structural Reliability Design

[†]Tsune Professional Engineering Office

減衰定数，入力地震動の決定を行い，地震波速度応答スペクトル解析を実施し，式(4)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変位を算出し，式(5)から継手部の拔出し長の算出を行った。

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi} S_v T_s \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (4)$$

$$|u_j| = u_0 \bar{u}_j \quad (5)$$

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)， $|u_j|$ は継手部の拔出し長(継手の管軸方向の伸縮量)， u_0 は無限連続梁とした場合の梁の管軸方向相対変位量(m)， \bar{u}_j は継手変位係数を表す。

図-4に「入力地震動⁶⁾」の1つを，図-5に「入力地震動の地震波速度応答スペクトル」，図-6に「地震動による縦断方向の継ぎ手部の拔出し長」と基盤最大加速の関係を示す。なお，継手部には経年劣化²⁾による補正を行っている。

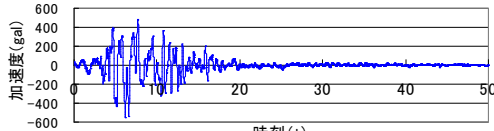


図-4 入力地震動⁶⁾

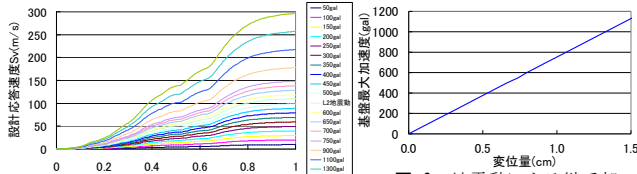


図-5 地震波速度応答スペクトル

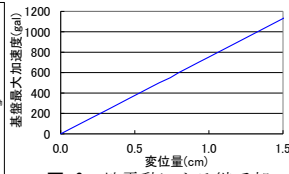


図-6 地震動による継手部の拔出し長

5. 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。なお，被害ランクCの耐震性能照査においては，設計照査用最大伸縮量を用いた。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。計画給水区域においては，1戸当たり4人とした。なお，各地震損失コストに関しては，参考文献²⁾等の値を参考に算出を行った。

表-1 水道管RR管φ50mmの被害区分と補修方法^{2), 5), 7)}

判定基準	水道管としての機能	継手部の拔出し長	復旧方法	営業損失	ユーザー損失
a (重大)	水道管としての機能を喪失 (完全に離脱)	60mm以上	開削工法(敷設替) 漏水調査	○	○
b (中程度)	漏水があっても水道管として使用可能	20~60mm	開削工法(敷設替) 漏水調査	-	-
c (健全・軽微)	被害なし	20mm以下	漏水調査	-	-

6. 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-7)」を評価指標とする。図-8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-9は，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分析の結果であり，地震損失コストは，上水道管路の初期建設費の約7%程度となった。本研究から，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。

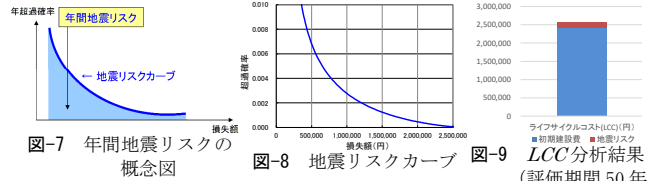


図-7 年間地震リスクの概念図

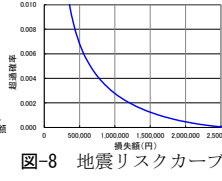


図-8 地震リスクカーブ

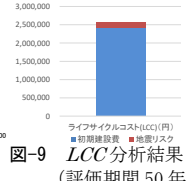


図-9 LCC分析結果(評価期間50年)

7. 最後に

本研究は，筆者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>)，及び下記の注釈の確認を行って下さい。

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。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。当方等に関して，上記等，その他への連絡，問い合わせ，その他等は，一切行わないで下さい。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」(「創価学会，カルト宗教等」)は，断固お断りです。本論文等に関して，「創価学会，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1月12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1月12日閲覧
- 4) 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1月12日閲覧
- 5) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2022年版
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017年
- 7) 厚生労働省 HP：<https://www.mhlw.go.jp>，2023年1月12日閲覧