

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た ライフライン管路の継手構造部の構造設計手法に関する研究

常井技術士事務所 正会員 ○常井 友也

1. はじめに

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1~5」の確認を行って下さい。

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。水道管路施設においては、耐震適合性（基幹管路が備えるべき耐震性能）のある管路として、水道管用硬質塩化ビニール製管路のゴム輪受口部が、通常の管路のゴム輪受口管より長く、地震動による地盤ひずみを大きく吸収できる性能を持つ「RR ロング受口管」が規格化されている。しかし、下水道管路施設においては、「ロング受口管（継手）」の管路は規格化されておらず、標準継手の管路のみ規格化されているのが現状である。参考文献²⁾では、ライフライン施設に潜在する地震時の被害特性を定量的、客観的に評価できる「地震リスク」を用いて、経年劣化した地盤埋設パイプラインの地震時損失に関する分析が実施されている。劣化予測式を基に「経年劣化」の現象を再現し、地盤埋設パイプラインの地震時損失を経過年数ごとに算出し、時系列分析を実施されている。さらに、参考文献²⁾では、「経年劣化による継手部の拔出し長」と「地震動による縦断方向の継手部の拔出し長」の合計値をライフライン管路の耐震性能の照査基準としており、敷設後50年付近になると、耐震性能（継手性能）が低下し、地震損失額が急増する結果となった。また、構造物の標準耐用年数は、従来50年としていたが、参考文献³⁾では、構造物の設計供用期間を100年とすることが示されており、本研究ではライフライン管路の中でも、下水道管路施設を取り上げ、ライフサイクルコスト分析の評価期間を100年と設定し、ライフライン管路のゴム輪受口部（継手部）をロング化することで、ライフサイクルコスト LCC を最小化するようなライフライン管路の継手構造部の構造設計手法を、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検討を実施する。

2. 構造信頼性設計に基づくライフライン管路のライフサイクルコスト分析

本研究で実施するライフライン管路の継手構造部の設計手法は、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、地震時損失を考慮したライフサイクルコスト分析を行い、ライフサイクルコスト LCC の最小化を図る継手構造部の設計を行うものである。本研究においては、地震リスクを「地震時損失（期待値）」として式(1)のように定義し、地震リスク分析を実施する。本研究で評価するライフサイクルコスト LCC は、式(2)が示すように、維持管理費用、補修補強費用（更生工法等）ロング継手管路にすることで生じる初期費用（材料増加費用）、地震時損失コスト（「地震リスク」）を評価項目とした。なお、補修補強費用等の損失額に関しては、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),5)}としてライフサイクルコスト LCC の改善を行った。

$$R = \sum P \times C \quad (1) \quad LCC(t) = \sum_{i=1}^t C_{\text{maintenance}}(i) + C_{\text{reinforcement}} + C_{\text{long-pipe}} + R(t) \quad (2) \quad PV = P_t \times \frac{1}{(1+r)^t} \quad (3)$$

ここで、 R は地震リスク（地震時損失）、 P は発生確率、 C は損失額、 $C_{\text{maintenance}}$ は維持管理費用、 $C_{\text{reinforcement}}$ は補修補強費用（更生工法）、 $C_{\text{long-pipe}}$ はライフライン管路のゴム輪受口部（継手部）のロング化に要する初期費用（材料増加費用）、 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、 t は経過年数を表す。

また、本研究では、図-1に示すような地震リスク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-2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。

3. 経年劣化を考慮したライフライン管路の解析対象モデル

ライフライン管路の解析対象モデルは、図-3に示すように、土被り1.0mの硬質塩化ビニール管φ200mm（延長4.00m）のJIS規格K6741を解析対象モデルとし、標準管路の継手部の長さ（受口の長さ）は $L=120\text{mm}$ とした。また、ロング受口（継手）は標準管路の継手部を $\Delta\theta=1.0\text{cm}$ 、 2.5cm 、 5.0cm 、 8.5cm 、 9.5cm ロング化した5つのモデル（図-5）を分析対象とした。本研究では、ライフライン管路の劣化として、「継手部の拔出し」を照査項目とする。「経年劣化による継手部の拔出し量」に関しては、参考文献^{4),5)}を参考に図-4のように想定した。なお、本研究では、ライフライン管路の劣化度の割合を50%として劣化曲線を算出し、構造物の性能評価を実施した。

4. 経年劣化を考慮したライフライン管路の耐震性能評価

本研究ではライフライン管路の耐震性能評価としては、「経年劣化による継手性能の低下（経年劣化による継手部の拔出し）」を照査項目とした。ライフライン管路の耐震性能評価は、式(4)（図-3、図-4）に示すように、「経年劣化による継手部の拔出し長」と「地震動による縦断方向の継ぎ手部の拔出し長」の合計値である「地震動の影響を受けた経年劣化管路の継手部の拔出し長」を耐震性能の基準とした。地震動の影響による継手部の拔出し長は、道路橋示方書・同解説⁶⁾を基に、耐震設計上の地盤種別、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(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変位を算出し、地盤ひずみから継手部の拔出し長の算出を行った。図-6に「入力地震動⁶⁾」の1つを、図-7に「入力地震動の地震波速度応答スペクトル^{7),8)}」、図-8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。

$$X_{\text{seis-de}} = X_{\text{de}} + X_{\text{seis}} \quad (4) \quad U_h(z) = \frac{2}{\pi} S_v T_s \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (5)$$

ここで、 $X_{\text{seis-de}}$ は地震動の影響を受けた経年劣化管路の継手部の拔出し長(m)、 X_{de} は経年劣化による継手部の拔出し長(m)、 X_{seis} は地震動による縦断方向の継ぎ手部の拔出し長(m)、 $U_h(z)$ 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)を表す。

5. 経年劣化を考慮したライフライン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、地盤埋設パイプライン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),4),5)}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下水道管路施設が地震により被災することで、下水道管路施設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下水道使用料金収入とする。ユーザー損失は、下水道管路施設が地震により被災することで、下水道施設の利用者（ユーザー）が下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。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。

6. 経年劣化を考慮したライフライン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-9）」を評価指標とする。図-8は、経過年数60年の標準継手のライフライン管路の地震リスクカーブを、図-10は、経過年数ごとに標準継手のライフライン管路の地震損失額を算出し、時系列分析したものである。

7. 経年劣化を考慮したライフライン管路のライフサイクルコスト分析

本研究では、参考文献³⁾を基に、ライフサイクルコスト分析の評価期間を100年とした。ライフライン管路のゴム輪受口部のロング化に要する単位長さ当たりの材料増加費用は、継手部が受口のためφ200mmの外径より大きい硬質塩化ビニール管の口径の単位長さ当たりの材料単価を計上した。さらに、本研究ではライフサイクルコストの縮減、また地震リスクコントロール（リスクの回避、軽減）の観点から、管路の「劣化、異常の程度は低い」とされるcランクを超える被害区分⁴⁾を経過した年数以降において、地震リスク分析の分析結果を基に、耐震性能（継手性能）が低下することで地震時損失コスト（地震リスク）が大きく増加する年数として、標準継手のライフライン管路では約64年、 $\Delta\theta=1.0\text{cm}$ のロング受口（継手）管路では約67年、 $\Delta\theta=2.5\text{cm}$ のロング受口（継手）管路では約75年、 Δ

キーワード 構造信頼性設計 地震リスク評価 ライフライン管路 地震ハザード曲線 耐震性能 地震リスクカーブ

連絡先 常井技術士事務所 <https://article-notice.wixsite.com/rules> (tsunei.tomoya@gmail.com)

$\theta = 5.0\text{cm}$ のロング受口(継手)管路では約86年において、更生工法によりライフライン管路の補修補強(耐震対策)を実施した。なお、更生工法により補修補強(耐震対策)を実施したライフライン管路は、継手部が存在しない接着接合管路のため、継手部の経年劣化は生じず、地震時の継手部の抜き出し量の耐震検討は必要としないため省略する。図-12に、評価期間100年におけるライフサイクルコストLCCの分析結果(ただし、地震リスク(地震時損失)を除く)を示す。ライフサイクルコスト分析の結果から、経過年数100年目において、最も経済的である継手構造は、 $\theta = 8.5\text{cm}$ のロング受口(継手)管路のケースとなった。次に、経過年数100年目のライフサイクルコストLCCに、管路の耐震性能評価に基づく地震リスク評価手法から求まる100年目の「地震時予想損失(地震リスク)」を加味したライフサイクルコストLCCの分析結果を図-13に示す。地震時予想損失を考慮したライフサイクルコスト分析の結果においても、同様の結果となった。本研究の結果から、「経年劣化による継手部の抜き出し」による現象を管路の構造設計において考慮した場合、現行のライフライン管路の継手長さを、 $\theta = 8.5\text{cm}$ 程度長くすることで、補修補強費用が低減され、管路のライフサイクルコストを低減することが可能となった。また、リブ付硬質塩化ビニール管においても耐震設計上、同様の結果が得られると考えられる。さらに、経済性の観点から、「経年劣化による継手部の抜き出し」に対する耐震化の手法としては、「更生工法(1スパン全体)」ではなく、「部分改築工法(劣化した継手のみ更生)」等を実施することで、今後、耐震対策費用(維持管理費用)を低減する必要があると考えられる。

8. 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」(https://article-notice.wixsite.com/rules)、及び下記の「注1~5」の確認を行って下さい。

- 注1 当方は、「出身大学・大学院の指導教員等、その他(関係者等、その他)」、「過去の勤務先・所属等」、「その他」とは一切関係ありません。当方等に関して上記等、その他への連絡、問い合わせ、その他等により、「当方に不利益等が生じる」、「私の現在及び将来への支障となる」可能性が高いため、一切行わないで下さい。上記等が当方に関して「関与、利用、その他等」することはお断りです。「兵庫県(市町等含む)、京都市、高槻市、上記0B等、日本技術士会、立命館大学技術士会、その他等(NTT関係等)」が当方に関して「関与、利用、その他等」することは、「当方に不利益等が生じる」、「私の現在及び将来への支障となる」可能性があるためお断りです。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。上記組織等、その他からの「連絡、問い合わせ、その他等」はお断りです。「人的ネットワーク等」を通じての関与等、その他も含め、断固お断りです。また、上記等、その他への「助力等、その他」は一切できません。「上記組織等」、「上記教員等が所属する地震工学委員会」、「日本技術士会」、「その他等」とは一切関係ありません。(当方は、「日本技術士会」、「立命館大学技術士会」、「その他等(CAE懇話会等)」を退会しています。)上記等、その他等を行った場合、その責任を負っていただきます。(「当方、及び論文等に関する留意事項」: https://article-notice.wixsite.com/rules)
- 注2 大学院博士課程の研究室では、担当講座の教授(教員等)に關係する人物(「研究室内の准教授、秘書、教員関係者の娘等」と「紹介」など)と「結婚・紹介」を引受けさせる行動・発言がありました。本件は、「京都大学アカデミックハラスメント」の担当窓口へ報告済み(3回の伝達)の案件です。「京都大学アカデミックハラスメントの担当窓口」へ「上記人物等」と「結婚・紹介」は、断固お断りです。また、伝達を行っています。当方は、「研究室内の准教授、秘書、教員関係者の娘等」と「結婚・紹介」は、断固お断りです。(当方は、何度か断固として拒否、お断りしています。)さらに、担当講座の教授の発言に教員関係者にも、別に「学部の指導教員の女性」を紹介しようとする可能性があります。「学部の指導教員の女性」と「結婚・紹介」は断固お断りです。立命館大学当局(アカデミックハラスメント担当部等)へ伝達から指導を行うよう依頼を行っています。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。そのため、「当方、及び本論文等」に関して、上記等、その他への連絡、問い合わせ、その他等は、上記等の事実を生じさせる可能性があるため、一切行わないで下さい。(上記関係者等、その他(上記の「研究室出身者」、「同窓生」等)が、「宗教勧誘・宗教活動」(「創価学会、カルト宗教等」)として、年賀状、メール等を送付してくることは断固お断りです。)(「当方、及び論文等に関する留意事項」: https://article-notice.wixsite.com/rules)
- 注3 「出身大学(学部)の修了」から、「当方が個人研究で行い、実施済みの研究」に関して、査読審査用の論文を提出前に、「論文執筆に関して、一切、学部の指導教員とは研究活動を実施していない、また当該論文(「下水道管の地震リスク」)に関して研究実績がない」にもかかわらず、「査読審査用の提出論文に共著者として、「学部の指導教員」の名前を記載してはどうか」等、様々な発言・事象が生じており、当方は「本論文、その他」に関して、「上記等、その他の事象等」はお断りです。(「当方、及び論文等に関する留意事項」: https://article-notice.wixsite.com/rules)
- 注4 本論文の耐震解析(「応答スペクトル図」の作成)にあたり、「出身大学・大学院の指導教員が作成したプログラム(上記がHP上で公開しているプログラム)」は、一切使用していません。当方、及び論文等に関して、上記等に連絡、その他等は、一切行わないで下さい。(「当方、及び論文等に関する留意事項」: 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, 2022年3月1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, 2021.9
- 【注5】 上記及び本論文、及び当方が過去に執筆した「下水道管施設・その他等の地震リスク(英訳含む)」に関する全ての論文、「地盤埋設パイプライン」及び「その他」の論文は、「論文に記載された所属」で実施した研究ではなく筆者が個人研究で行ったものであり、「論文に記載された所属」とは一切関係ありません。さらに、当方が執筆した「博士論文・上記及び本論文・その他等」は、「過去の勤務先等」とは一切関係ありません(当方が執筆した「博士論文・上記及び本論文・その他等」は、「過去の勤務先等」で実施したものではありません。さらに、論文の作成等に関し、過去の勤務先等の「業務を利用・使用」、「業務の持出し」等は、一切行っておりません。筆者が個人研究で「研究・調査・執筆」を行ったものです。上記等、その他等に関し、過去の勤務先、その他等の成果、実績、その他等とするは一切認めません。筆者が個人研究を行った場合、その責任を負っていただきます。問合せ等は本論文の上記メールアドレスへお願いいたします。(「当方、及び論文等に関する留意事項」: https://article-notice.wixsite.com/rules)
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2017年
- 4) 国土交通省HP: ストックマネジメント手法を踏まえた下水道長寿命化計画策定に関する手引き(案), 2022年3月1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, 2022年3月1日閲覧
- 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

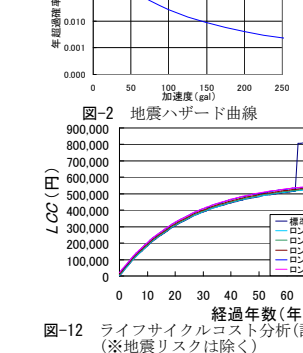
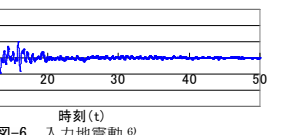
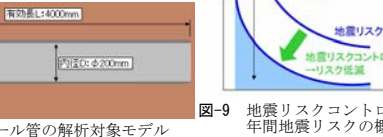
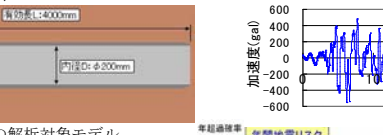
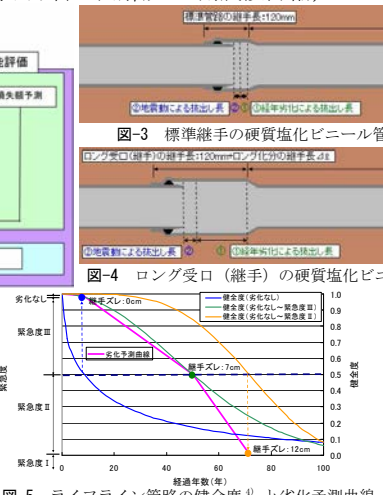


表-1 硬質塩化ビニール管φ200mmの被害区分と補修方法^{2), 4), 5)}

判定基準	(1) [標準継手] 継手の抜き出し長	(2) [ロング受口(継手)] 継手の抜き出し長	復旧方法
a	120mm以上(脱却)	120mm+ロング化した継手部の長さ以上(脱却)	開削工法・カメラ調査
b	70~120mm	70~120mm+ロング化した継手部の長さ	更生工法・カメラ調査
c	70mm以下	70mm以下	カメラ調査

