

液状化による地震リスクを考慮した下水道管路施設の長寿命化計画に関する研究

常井 友也¹

¹兵庫県 宝塚土木事務所 (〒665-8567 兵庫県宝塚市旭町2-4-15)
E-mail : Tomoya_Tsunei@pref.hyogo.lg.jp

近年、下水道管路施設の老朽化に伴う改築・更新事業が多くの自治体で実施されており、その事業計画の実施手法として、アセットマネジメントによる長寿命化計画が実施されている。しかし、下水道管路施設のアセットマネジメントを実施する際、下水道管路の地震リスクの算出が正確に評価されていないのが現状である。本研究では、地震時の液状化による被害を地震リスクアセスメントの対象とし、地震リスクの影響を考慮した長寿命化計画の検討を行う。解析モデルとして、小口径管路φ200mm、φ250mmとシールド工法により敷設された大口径管路φ1800mmを対象とし、被災した地中埋設管の補修・補強、再構築費用等の損失額、機能不全による営業損失、下水道施設を使用できないことにより生じるユーザー損失を算出し、これらの情報を基に地震リスクを考慮した長寿命化計画の検討を行う。

Key Words : *liquefaction, Sewage Pipe Rehabilitation, Seismic Hazard Curve, Seismic Risk Curve*

1. はじめに

近年、下水道管路施設の老朽化に伴う改築・更新事業が多くの自治体で実施されており、その事業計画の実施手法として、アセットマネジメントによる長寿命化計画が実施されている。参考文献¹⁾では、下水道管路の継ぎ手性能を照査項目とした地震リスクを考慮したアセットマネジメントの検討が実施されている。

また、各自治体では、下水道地震対策計画策定業務等が実施されており、被害想定としてPL値を照査項目とした用いた検討が実施されている²⁾。本研究においても、地震時の液状化による被害をPL値で照査し、これを基に、地震リスクアセスメントを実施し、地震リスクの影響を考慮したアセットマネジメントの計画手法の検討を行う。

本研究での解析対象モデルとして、開削工法により敷設されたφ200mm、φ250mmの小口径管路とφ1800mmのシールド工法により敷設された大口径管路を対象として被災した地中埋設管の補修・補強、再構築費用等の損失額、機能不全による営業損失、下水道施設を使用できないことにより生じるユーザー損失を算出し、これらの情報を基に下水道管路施設の地震リスクアセスメントの実施を行う。

2. 下水道管路施設の地震リスク評価

本研究においては、リスクを「期待損失 (Expected loss)」として取り扱い、地震リスク分析を実施する。したがって、リスクは以下のように定義することができる。

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n P_i \times C_i \quad (1)$$

ここで、 R は期待損失、 P は発生確率、 C は損失額を表す。

次に、本研究では、図-1に示す地震リスクの評価手法を用いて、下水道管路施設の地震リスクの算出を行う。解析対象構造物の耐震性能評価では、初めに、解析対象構造物が埋設されている解析対象地盤の液状化指数を、設計水平震度ごとに計算を行う。

解析対象地盤の液状化指数と設計水平震度と関係から、各液状化指数で発生する限界状態発生確率を求め、その確率と基盤最大加速度との関係を結びつけることによって地震損傷度曲線 (Fragility Curve) を得ることができる。そして、地震損傷度曲線から限界状態間の発生確率、つまり損傷レベル発生確率へ変換することができる。

解析対象構造物の性能評価が終了すると、次のステップではイベントツリー解析を実施する。イベントツリー解析を実施することで、損失額と損傷レベル発生確率 (Probability Mass Function: PMF)、地震予想最大損失額 (Probable Maximum Loss PML)、地震予想最大損失額

と基盤最大加速度の関係（損失関数）を評価することができる。

最終段階では、地震危険度解析から得られた地震ハザード曲線と解析対象構造物の性能評価から算出した損失関数を重積することで地震動の不確実性を考慮した損失額の超過確率を算出し、地震リスク評価が実施できる地震リスクカーブの算出を行う。

この地震ハザード曲線が囲む面積である年間地震リスクの算出を行い、改築・更新費用に加えることで地震リスクを考慮したアセットマネジメントが可能となる。

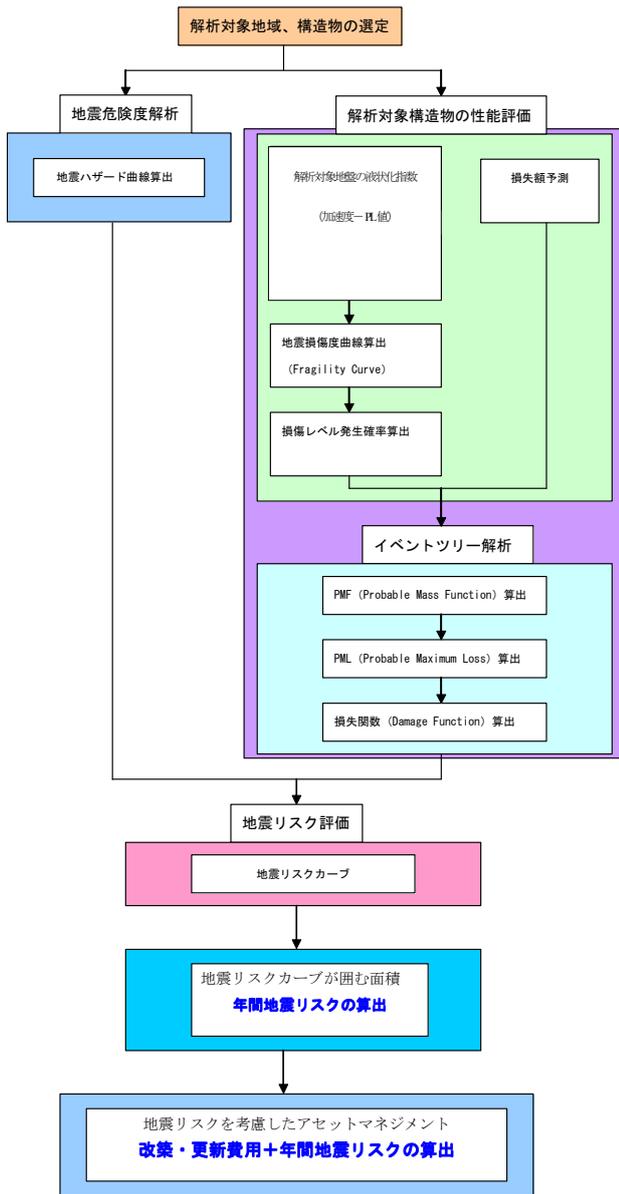


図-1 地震リスクマネジメントの評価フロー

3. 地震危険度解析

(1) 地震ハザード曲線

解析対象地域は、兵庫県神戸市（緯度34.41度，経度135.11度）とし，解析対象地域における歴史地震カタログは，抽出期間1300年，対象半径300 kmを抽出条件とし，M5～7.5までの歴史地震102個を分析対象とした⁴⁾。

図-2に解析対象地域の地盤モデル，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。本研究では地震ハザード曲線の作成には「河角の方法」を採用し³⁾，ランダムな震源を対象としていることから確率過程はポアソン分布に従うこととする。

図-2に解析対象地域の地盤モデル，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。本研究では地震ハザード曲線の作成には「河角の方法」を採用し³⁾，ランダムな震源を対象としていることから確率過程はポアソン分布に従うこととする。

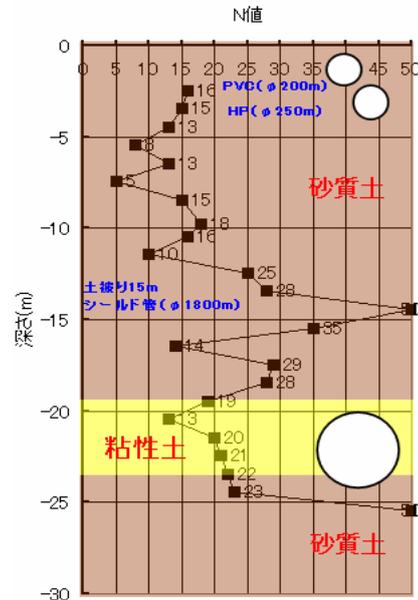


図-2 解析対象モデル

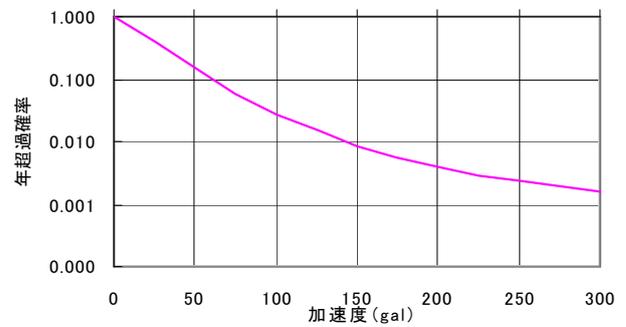


図-3 解析対象地域における地震ハザード曲線

(2) 地震動の不確実性

地震動の不確実性としては，距離減衰式による基盤最大加速度 α の推定誤差が存在する。本研究においては基盤最大加速度 α を確率変数としたとき，基盤最大加速度 α の平均値と標準偏差を σ_α ，とし， $\ln X$ の平均値 λ_α と標準偏差 ζ_α をパラメータとする対数正規分布でモデル化した。確率密度関数を $h(\alpha; \lambda_\alpha, \zeta_\alpha)$ と表記する。

$$h(\alpha; \lambda_\alpha, \zeta_\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_\alpha\alpha} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln\alpha - \lambda_\alpha}{\zeta_\alpha}\right)^2\right] \quad (2)$$

ここで，

$$\lambda_{\alpha} = \ln \alpha_m - \frac{1}{2} \zeta_{\alpha}^2 \quad (3)$$

$$\zeta_{\alpha} = \sqrt{\ln \left(1 + \frac{\sigma_{\alpha}^2}{\alpha_m^2} \right)} \quad (4)$$

地震動の不確実性は、地震リスクカーブを算出する際、地震動の不確実性を考慮した損失額の超過確率を定量的に評価するために用いる。

4. 下水道管路施設の液状化指数を照査項目とした耐震性能評価

(1) 下水道管路施設の解析対象モデル

本研究における解析対象構造物は図-2に示すようなモデルとし、小口径管路は、φ200mm（土被1.5m）のJSWAS規格の硬質塩化ビニール管、φ250mm（土被3.0m）の鉄筋コンクリート管B型JSWAS A-1、大口径管路のシールドトンネルは、鉄鋼製のセグメント（セグメント幅：750mm、高さ：75mm）を使用した直径φ1800mm（土被り20m）を解析対象モデルとした。

(2) 下水道管路施設の耐震性能評価

参考文献²⁾には、下水道管路施設の耐震化計画の優先順位を決定する際の手法等、地震対策計画に関する事項が明記されている。過去の地震による被害状況では、液状化による被害が大きく、被害想定など検討する際に、評価指標となるのが PL 値^{2), 5)}であり、本研究においても、PL 値を下水道管路施設の性能評価基準として、地震リスクアセスメントを行うこととする。

地震リスクアセスメントを行うには、解析対象地盤における基盤最大加速度と PL 値の関係が必要となる。本研究では、液状化指数 PL 値を計算する際に用いる設計水平震度 k_{eq} を変化させて、各設計水平震度ごとの PL 値の計算を行った。設計水平震度と PL 値の関係を図-4に示す。ここで、図-4において設計水平震度 0.15 において、PL 値が上昇しているのは、PL 値を算出するのに、レベル 1 の動的せん断強度比を用いて計算を行ったためである。

また、本研究では、設計水平震度 $k_{\text{eq}} = a_{\text{max}}/g$ となることから、地震による慣性力が時間と無関係に一定の大きさで作用し続けると仮定を行い、最大加速度 a_{max} の算出を行う。

さらに、本研究では、液状化指数 PL 値を判定基準とし、大規模地震による下水道被害想定手法及び想定結果の活用方法に関するマニュアル²⁾、下水道長寿命化支援制度に関する手引き（案）⁶⁾を参考に、管路の健全度調査判定基準 a, b, c の 3 ランクの被害区分に相当する PL 値の

値を表-1のように定義する。

下水道管路施設が地震により被災し、亀裂・破損・変形・継ぎ手のずれ等に対する補修が必要とされる管路の被災基準としては、「管路のたるみ・蛇行」が、φ250mm未満では管径の1/5以上のたるみ、φ250mm以上では5cm以上のたるみが生じる場合としている。²⁾ a, b ランクは、災害査定範囲内であるため改築を実施し、c ランクに関しては、被災していないので補修を実施しないこととする。

硬質塩化ビニール管・鉄筋コンクリート管とシールドトンネルの被害区分と補修方法をそれぞれ、表-2、表-3に示す。ただし、シールドトンネルの被害区分 a ランクの補修に関しては、更生工法の中でも、製管工法を採用し上下方向のたるみを裏込め材とスペーサー等で蛇行修正を行い、口径サイズを縮小して更生を行うものとする。また、小口径管路に関しても、反転工法による更生を念頭においているが、上下方向のたるみが激しい場合は、鞘管工法・製管工法等の工法を採用し、更生するものとする。

表-1 下水道管路の被災状況の評価基準

判定基準	上下方向のたるみ	PL 値	地盤状況
a	φ700 mm未満:内径以上 φ1650 mm以上:内径の1/4 以上	PL>15	液状化の可能性が高い
b	φ200mm 未満:管径の1/5 以上 φ250mm 以上:5cm 以上のたるみ	5<PL≤15	液状化の可能性はある
c	φ200mm 未満:管径の1/5 未満 φ250mm 以上:5cm 以下のたるみ	PL≤5	液状化の可能性は低い

表-2 硬質塩化ビニール管・鉄筋コンクリート管の被害区分と補修方法

被害区分	PL 値	補修の方法
a	PL>15	新規建設による改築を行う
b	5<PL≤15	更生工法による補修を行う
c	PL≤5	補修や改良は必要としない

表-3 シールドトンネルのセグメントの被害区分と補修方法

被害区分	PL 値	補修の方法
a	PL>15	更生工法による補修を行う
b	5<PL≤15	部分補修を実施する
c	PL≤5	補修や改良は必要としない

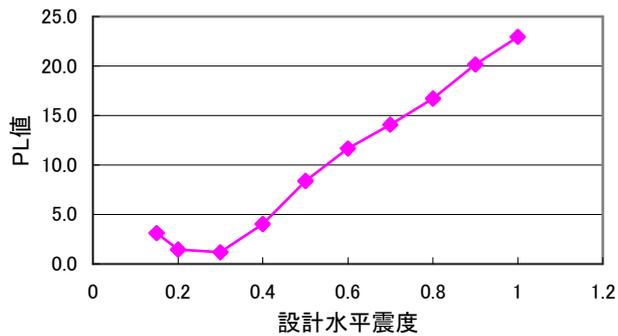


図-4 解析対象地盤の設計水平震度と PL 値の関係

(3) 地震損失コスト評価

本研究において考慮する損失コストは、以下の 3 つを評価することにする。

- ・物理的損失
- ・機能不全による営業損失
- ・機能不全による間接的な損失

a) 物理的損失

物理的損失は地中埋設管の復旧コストつまり、補修費、補強費用、調査費用のみを評価することにする。

開削工法、シールド工法による管きよの1mあたりの復旧コスト^{7, 9)}を表-4に示す。ランクcに判定された場合は、管きよは健全な状態に保たれているため補修費用は発生しないが、地震発生後にはカメラ・目視による地震被害調査費用が発生するものとする。ランクbに判定された場合は、鉄筋コンクリート管に関しては上表に示したように軽微な補修は必要とするものの継続して使用することが可能な状態に保たれており、更生工法による補修補強を実施するものとする。

さらに硬質塩化ビニール管φ200mm、鉄筋コンクリート管の更生工法には、自立管の価格を用いた。φ1800mmの更生工法には複合管である「ダンビー工法」、止水材には浸透性吸水防止材「マジカルリペラー」、カメラ調査には「グラウンドビーバーシステム」並び「静止画像製作及び編集技術」を採用し、これらの価格については「新技術情報提供システムNETIS⁷⁾」を参考に算出を行った。開削工法の工事費用及び経費率は参考文献⁹⁾を参考に算出を行った。ただし、シールド管のセグメント外径はφ1800mmであり2次覆工の厚さを考慮すると更生工法の口径サイズはφ1500mmとなる。

表-4 地中埋設管の補修・補強費
(1mあたりの費用)^{7, 9)}

管径	工法	工事費(円/m)
φ200mm	開削工法	112,000
	更生工法	72,640
φ250mm	更生工法	132,000
	開削工法	79,840
φ1800mm	更生工法	444,000
	止水材	71,000
カメラ調査	—	12,000

b) 機能不全による営業損失¹⁾

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。

管路施設の復旧日数に関しては、自治体が管理する管路延長、復旧作業に投入する人員数などに大きく左右するとともに、下水道は上水道が復旧しない間は使用できないことから、下水道の復旧は上水道の復旧状況に合わせながら実施されることから下水道の復旧日数を予測することが困難である。そのため、内閣府が発刊した「首都直下地震に係る被害想定手法について¹²⁾」を参考に、応急復旧日数を30日と仮定した。

下水道の使用量及び使用料金については、一世帯5家族を対象として下水道の使用料金の算出を行う。給水量と汚水量の関係については、参考文献^{13), 14)}から浸透・蒸発・漏水などの損失推量が存在するので給水量のすべてを汚水量にはならないが、実用的には等しいとみなすことができる¹³⁾。したがって、一世帯5家族で一月あたりの給水量は、30.6 (m³/世帯・月)、下水道使用料金は1 m³につき170円と本研究では仮定した。

また、下水道管路の断面によって流下させることができる汚水量が異なることから、小口径管路φ200・φ250mmと大口径管路φ1800mmに流れ込む汚水量の計算を行う。ただし、下水道管路施設については、汚水管を対象として算出を行う。参考文献^{13), 14)}を基に、管きよの断面決定に際しては下記に示す設計流量を用いて算定を行う。

$$\text{設計流量} = \text{排水(集水)面積} \times \text{単位汚水量} (\text{m}^3/\text{秒}/\text{ha}) \\ + \text{地下水} + \text{余裕量} \quad (5)$$

また、余裕量に関しては、計画時間最大汚水量に対して表-5のような余裕量を見込むものとし、φ1800mmの大口径管路に関しては余裕率を50%とし、管きよ勾配に関しては、参考文献^{13), 14)}から表-6に示すような勾配を用いることとする。

管きよ内に流れ込む汚水量は、設計流量から余裕量を差し引くこと求めることができ、機能不全による営業損失は表-7に示すような損失額となった。被害区分c、被害区分bの場合の補修は、下水道を流下させることが可能であることから、機能不全による損失は発生せず、被害度aの場合にのみ、機能不全による損失が発生するものとした。

表-5 下水道管の断面の余裕率^{13), 14)}

管径	余裕量
小口径管：φ200mm～φ600mm	100%
中口径管：φ700mm～φ1500mm	50%～100%
大口径管：φ1650mm～φ3000mm	25%～50%

表-6 下水道管の代表的な勾配・流速・流量^{13), 14)}

管径	汚水管			合流管		
	勾配(%)	流速(m/s)	流量(m ³ /s)	勾配(%)	流速(m/s)	流量(m ³ /s)
φ250mm	5.0	0.801	0.039	10	1.135	0.056
φ300mm	4.0	0.823	0.058	8	1.167	0.082
φ450mm	2.5	0.88	0.140	5.5	1.31	0.208
φ600mm	2.2	1.018	0.288	4	1.377	0.389
φ900mm	1.7	1.191	0.758	2.6	1.476	0.939
φ1200mm	1.4	1.317	1.489	2	1.577	1.784
φ1500mm	1.2	1.417	2.504	1.6	1.638	2.895
φ1800mm	1.0	1.459	3.713	1.4	1.728	4.397

表-7 機能不全による営業損失 (30日)

管径	汚水量(m ³ /s)	収入料金(千円)
φ200mm	0.018	1
φ250mm	0.020	1
φ1800mm	2.475	109

c) ユーザー損失¹⁾

ユーザー損失とは、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。下水道施設のユーザー(利用者)としては、住民生活で生じる生活用排水と、都市活動で生じる業務営業用排水および工場用排水の3区分が存在する。本研究では、住民生活で生じる生活用排水(一般家庭の家事に要する水)を排水できないことにより生じる経済損失の算出を行う。生活用水を排水できないことによる経済損失は、1人1日当たり被害額原単位(円/人・日)に排水区域内の被害人口(人)と被害日数(日)を乗じて算定する。1人1日当たり被害額原単位の算出に関しては、生活排水を下水道に排水できない状態であることから、日常生活品の代替品・サービス購入代替行動により水道水を使用しない生活を想定したケースを参考に算出を行った¹⁵⁾。表-8に示すように使用用途別の物品・サービス購入費用

から生活被害原単位の算出を行った。

また、φ200mm、φ250mm、φ1800mmそれぞれの排水区域内の計画人口の算出にあたっては、生活汚水量原単位を250L/人*日^{13), 14)}として人口の算出を行った。下水道の復旧日数は、前節と同様に内閣府が発刊した「首都直下地震に係る被害想定手法について¹²⁾」を参考に、応急復旧日数を30日と仮定した。

被害区分c、被害区分bの場合の補修は、下水道を流下させることが可能であることから、機能不全による損失は発生せず、被害度aの場合にのみ、ユーザー損失による損失が発生するものとした。したがって、地震被害による30日の下水道施設の利用不可能により生じるユーザー損失は、表-9に示すような値となった。

表-8 使用用途別の物品・サービス購入費用¹⁴⁾

使用用途	代替となる物品・サービス	単価(円/個)	1人1日当たり使用回数(回/人・日)	1人1日当たり購入費用(円/人・日)	販売価格(円/個)	販売数量(1数量/個)	単価(1数量当たり販売価格)
水洗トイレ	携帯トイレ(大用)	550	1	大1回	550	550	1
	携帯トイレ(小用)	100	4	小4回	400	500	5
洗面・手洗い	ウェットティッシュ	9	8	トイレ5回+朝昼晩各1回	72	680	80
	ガム	10	3	朝昼夕各1回	30	100	10
風呂	ウェットタオル	16	4	朝昼夕各1回	64	480	30
	シャンプーナフ	18	2	朝夕各1回	36	480	30
炊事	ポトルドウォータ	100	2	朝食、夕食、各1回	200	100	1
	弁当	450	3	朝昼夕各1回	1,350	450	1
洗濯	使い捨て下着	300	1	シャツ、パンツ、靴下、各1枚	300	300	1
	ドライクリーニング	2,000	1	1上着上下1人分	2,000	2,000	1
全体	-	-	-	-	4998	-	-

表-9 ユーザー損失額^{13), 14)}

管径	汚水量(m ³ /s)	被害人口(人)	被害日数(日)	1人1日当たり被害額原単位(円/人・日)	経済損失額(千円)
φ200mm	0.036	2029	30	4998	30
φ250mm	0.039	2202	30	4998	33
φ1800mm	3.713	277215	30	4998	4157

5. 解析対象地点における地震リスク分析

(1) 損傷レベル発生確率

基盤最大加速度 α が与えられたときの応答変位を $\delta_R(\alpha)$ 、降伏、終局状態等の限界状態における変位を $\delta_K(\alpha)$ とすると、応答変位 $\delta_R(\alpha)$ が限界状態変位 $\delta_K(\alpha)$ より大きい応答値が発生する確率、つまり構造物の破壊確率を P_f とすると、この確率は以下のように表すことができる。ここで、 X は限界状態変位 $\delta_K(\alpha)$ 、応答変位 $\delta_R(\alpha)$ が確率変数であるときの性能関数とする。

$$X = \frac{\delta_K(\alpha)}{\delta_R(\alpha)} \quad (6)$$

$$P_f = P(X) \quad (7)$$

ただし、破壊確率が生起するには損傷レベル $X \leq 1$ を満たさなければならない。

また、耐震設計においては、材料強度、部材寸法、構造解析等において様々な不確実性を有しており、応答変位、限界状態変位に関してもばらつきが発生する。本研究においては、変位のばらつきを対数正規分布を用いて信頼性評価を実施する。地盤の生起確率の算出に用いる変動係数は、参考文献など¹⁶⁾を参考に一律、0.3と仮定した。

確率変数 $\delta_R(\alpha)$ 、 $\delta_K(\alpha)$ が対数正規分布に従うならば、性能関数 X も対数正規分布に従い、破壊確率 P_f は以下の式で表すことができる。

$$P_f = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_X x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda_X}{\xi_X}\right)^2\right] dx \quad (8)$$

$$\lambda_X = \ln \delta_k - \ln \delta_{resp} \quad (9)$$

$$\xi_X = \sqrt{\ln\left\{(1+\nu_K)^2 \cdot (1+\nu_R)^2\right\}} \quad (10)$$

ここで、 δ_{resp} は応答変位の平均値、 δ_k は終局状態変位の平均値、 ν_R は応答変位の変動係数、 ν_K は終局状態変位の変動係、 $\ln X$ の平均値、標準偏差はそれぞれ λ_X 、 ξ_X を表す。

次に、積分関数を式(15)とし

$$z = \delta_{resp} \cdot x \quad (11)$$

z を変数変換すると、 P_f は式(12)のように書き換えることができ、この式は応答変位の平均値 δ_{resp} が与えられた際の条件付限界状態発生確率 $P_f(\delta_{resp})$ となる。

$$P_f = \int_0^{\delta_{resp}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_X z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \ln \delta_K}{\xi_X}\right)^2\right] dz \quad (12)$$

ここで、 δ_{resp} を変数として $0 \sim \infty$ まで上式を積分すると δ_{resp} に対応した損傷確率を与える地震損傷度曲線 (Fragility Curve) が得られる。限界状態変位 δ_k を被害区分 a, b, c にあたる変位として与えるとそれぞれの限界状態における条件付発生確率 F_a 、 F_b を求めることができる。図-5 に解析対象地盤のフラジリティカーブを示す。

さらに、応答変位 δ_{resp} は基盤最大加速度 α から算出されるので、限界状態発生確率は基盤最大加速度に従うことから限界状態発生確率 P_f と応答変位 δ_{resp} の関係は、限界状態発生確率 $P_f(\alpha)$ と基盤最大加速度 α との関係に結び付けることができる。

また、限界状態間の発生確率、つまり損傷レベル発生確率 $Prob(c_i|\alpha)$ は任意の加速度 α に対して、応答変位 δ_{resp} が求まり、そのばらつきを考慮することで限界状態発生確率 $P_f(\alpha)$ を算定し、損傷レベル発生確率 $Prob(c_i|\alpha)$ へ変換することができる。損傷レベル発生確率 $Prob(c_i|\alpha)$ は以下のような関係式で算出することができる。ここで、 c_i は、各損傷レベルで生じる損失額を示す。

$$Prob(c_1|\alpha) = 1 - F_1(\alpha) \quad (13)$$

$$Prob(c_2|\alpha) = F_1(\alpha) - F_2(\alpha) \quad (14)$$

$$Prob(c_3|\alpha) = F_2(\alpha) \quad (15)$$

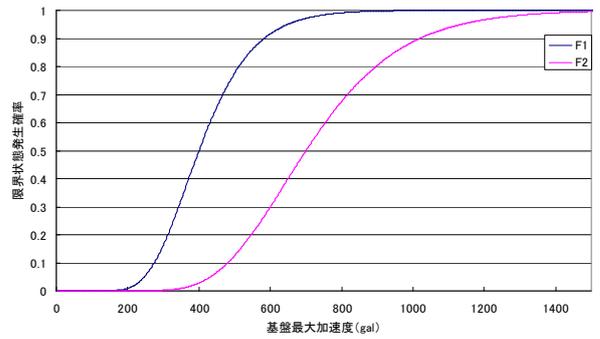


図-5 解析対象地盤のフラジリティカーブ

(2) イベントツリー解析

イベントツリー解析とは、地震リスク分析では解析対象構造物の情報を得るためには被害形態を分析し、発生確率と損失額との関係を明確するための手段である。地震損傷度曲線 (Fragility Curve) から損傷レベル発生確率を計算し、これを損失額と乗じることで各損傷レベルの損失額リスクを算出することができる。また、各損傷レベルの損失額リスクの合計額はNEL (Normal Expected Loss) と定義し、損失額リスクと損失額リスクの標準偏差は以下の式で計算することができる。

$$c_m = \sum_{i=1}^n c_i \cdot prob(c_i|\alpha) \quad (16)$$

$$\sigma_c^2 = \sum_{i=1}^n (c_i - c_m)^2 \cdot prob(c_i|\alpha) \quad (17)$$

(3) Probable Mass Function (PMF)

Probable Mass Function (PMF) とは、損失額と損傷レベル発生確率の関係を示したものであり、本研究においてはPMFを上、下限がb, aで与えられているβ分布と仮定する。ただし、下限値aを0, 上限値bを c_{max} と設定している^{2), 17), 18)}。β分布とは下記に示すような確率密度関数 $f(c; q, r | a)$ であり、 q, r は分布のパラメータである。 $B(q, r)$ はβ関数であり、ベータ関数とガンマ関数には上記に示すような関係がある。

$$f(c; q, r | a) = \frac{1}{B(q, r)} \cdot \frac{(c-a)^{q-1} \cdot (b-c)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}} \quad (18)$$

$$q = -\frac{\mu_x - a}{\mu_x - b} r \quad (19)$$

$$r = \frac{\frac{-\frac{\mu_x - a}{\mu_x - b} (b-a)^2}{\left(-\frac{\mu_x - a}{\mu_x - b} + 1\right)^2 \times \sigma_x^2} - 1}{1 - \frac{\mu_x - a}{\mu_x - b}} \quad (20)$$

$$B(q, r) = \frac{\Gamma(q)\Gamma(r)}{\Gamma(q+r)} \quad (21)$$

また、β分布の超過確率 $R(c | a)$ は以下のように表すことができ、90%非超過確率時の損失額を算出する際に用いる。

$$R(c | a) = \int_c^{c_{max}} f(x; r, q | a) dx \quad (22)$$

(4) 損失関数

損失関数とは地震予想最大損失額PML (Probable Mass Function) と基盤最大加速度の関係を表したものである。これにより、任意の基盤最大加速度に対する損失額 (NEL, PML) を容易に読み取ることができる。

(5) 地震リスクカーブ

地震リスクカーブとは、地震ハザード曲線と損失関数から基盤最大加速度の関係を消去し、損失額の超過確率と損失期待値の関係を示すものである。まず初めに、任意の基盤最大加速度が与えられた際、地震動の不確実性を考慮した損失額の超過確率 $\Omega(c | \alpha_m)$ を以下の式を用いて算出する。

$$\Omega(c | \alpha_m) = \int_0^{\infty} h(\alpha; \lambda_\alpha, \zeta_\alpha) \cdot R(c | \alpha) d\alpha \quad (23)$$

次に、トータルの基盤最大加速度を考慮するために、超過確率 $\Omega(c | \alpha_m)$ に α_m の発生確率を乗じることで、損失額 c の超過確率 $G(c)$ を以下の式を用いて算出する。また、**図-6**は、地震ハザード曲線と損失関数から基盤最大加速度の関係を消去し、損失額の超過確率と損失期待値の関係を示している地震リスクカーブである。

$$G(c) = \int_0^{\infty} p(\alpha_m) \cdot \Omega(c | \alpha_m) d\alpha_m \quad (24)$$

(6) 解析結果

図-7は、神戸市における管径別布設延長を示したので、「全延長」とは神戸市の管路布設延長を用いて計算を行ったものであり、本研究では、250mm から 700mm の管路延長を 250mm, 800mm 以上を 1800mm の管路延長と仮定して計算を行った。

図-8は、「補修費+ユーザー損失+営業損失」を考慮した場合の地震リスクカーブを示す。アセットマネジメントに加味する地震リスクは、年間地震リスクを用いることとし、**図-15**が示すように、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。**図-6**から、補修費+ユーザー損失+営業損失を考慮した管路の全延長の年間地震リスクは、3.0億円となった。

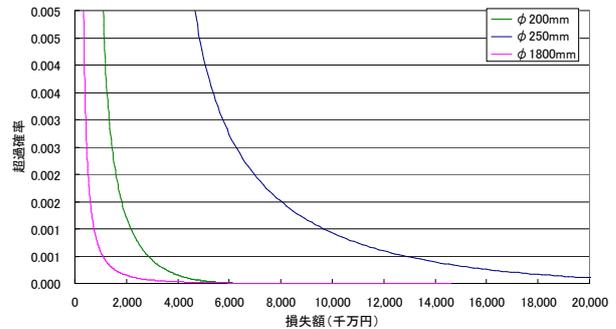


図-6 地震リスクカーブ：補修費+ユーザー損失+営業損失 (全延長)

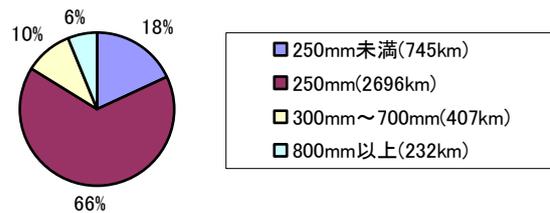


図-7 管径別布設延長 (神戸市)¹⁵⁾

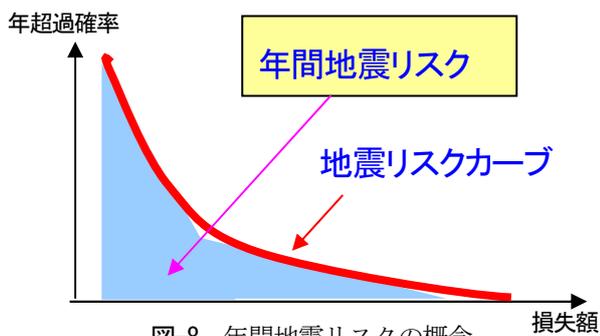


図-8 年間地震リスクの概念

7. 地震リスクを考慮したアセットマネジメントの導入事例

地震リスクを考慮したアセットマネジメントを実施するために、導入事例として、国土交通省が公開している「長期的な改築需要見通しの検討例」¹⁹⁾で記載されているアセットマネジメントの分析結果を参考に、地震リスクを考慮したアセットマネジメントを実施する。

現状のアセットマネジメントにおける評価式は、式(25)が示すように、事業費であるLCCに、点検費用、補修費用を足し合わせることで、評価を行っている。

$$LCC=C_t+C_r \quad (25)$$

ここで、 C_t ：点検費用、 C_r ：点検費用

次に、地震リスクを考慮したアセットマネジメントの算出方法としては、式(26)が示すように、点検費用、点検費用、年間地震リスクを足し合わせることで、評価することができる。

$$LCC=C_t+C_r+R \quad (26)$$

ここで、 C_t ：点検費用、 C_r ：点検費用、 R ：年間地震リスク（損傷時損失額）

アセットマネジメントを実施する際の改築・更新の手法としては、単純更新50年と予防保全型管理を行った2つのケースで実施している。

さらに、対象とした損失コストは、「補修費用+下水道使用料金+ユーザー損失結果」の3つを採用した。

「長期的な改築需要見通しの検討例」では、詳細な都市名が公開されていないことから、管路延長が類似している神戸市の年間地震リスクを用いた。前節で算出を行ったように、神戸市の年間地震リスクの試算結果は、年間3.0億円となった。

図-9は、全てを標準耐用年数で単純に改築するケースの事業費を示したものであり、全ての管路施設が、標準

耐用年数で更新するシナリオを想定し、地震リスクを考慮して事業費を算出したものである。

図-9が示すように、全てを標準耐用年数で単純に改築を行った場合、事業費としては10億～160億程度となり、事業費に対する地震リスクの額は、2%～30%程度となった。

図-10は、健全度の低下した路線のみを改築するケース（予防保全型施設管理を実施するケース）であり、健全率予測式によって、管路施設全体に占める健全度の低下した路線延長を把握し、当該路線のみを改築し、地震リスクを考慮して事業量を算出ものである。

図-10が示すように、予防保全型施設管理を行った場合、事業費としては20億～50億程度となり、事業費に対する地震リスクの額は、6%～15%程度となった。

さらに、下水道管路施設の地震リスクを最小化するには、予防保全型の改築更新事業を進めることで下水道管路施設全体の地震リスクを低減させることが可能となる。実務的に地震リスクによる損失額を抑えるには、布設延長が長く、また土被りが浅い開削工法により布設されたヒューム管を管更生により改築更新事業を進めることで、耐震性能を向上させることができ、地震リスクを低減することが可能となる。

8. 結論

本研究では、下水道管路の液状化による被害を想定した地震リスクの影響を考慮したアセットマネジメントの実施手法と事例の検討を行った。地震リスクの影響を考慮したアセットマネジメントの導入事例として、「長期的な改築需要見通しの検討例」で示されている公共下水道の事例を参考に、年間地震リスクを加味し、地震リスクを考慮したアセットマネジメントの実施を行った。

これらの解析手法により、現在、各自治体で実施されているアセットマネジメントの改築・更新費用等々の支出額に年間地震リスク追加することで、地震リスクを考慮したアセットマネジメントを実施することが可能となる。

全てを標準耐用年数で単純に改築を行った場合、事業費としては10億～160億程度となり、事業費に対する地震リスクの額は、2%～30%程度となった。予防保全型施設管理を行った場合、事業費としては20億～50億程度となり、事業費に対する地震リスクの額は、6%～15%程度となった。

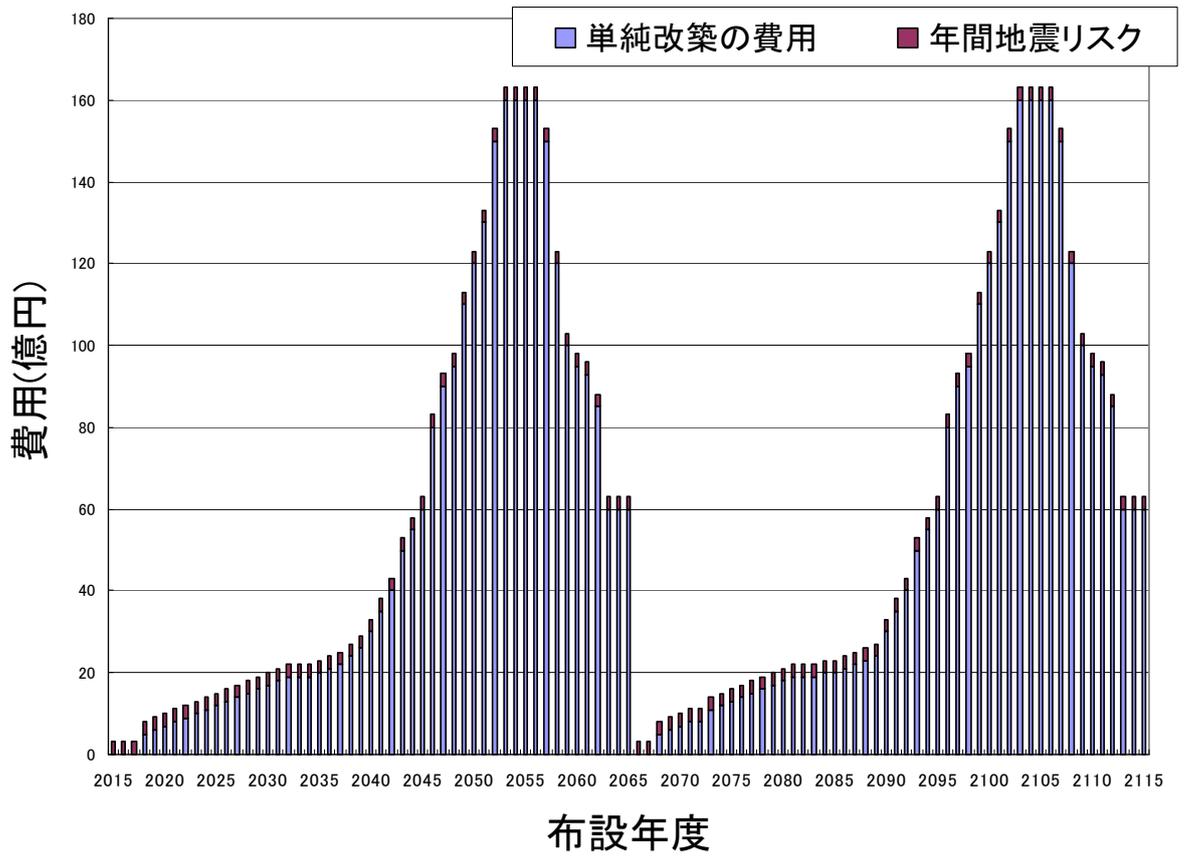


図-9 改築・更新費用：標準耐用年数（50年）で単純改築を実施したケース（地震リスクを考慮）

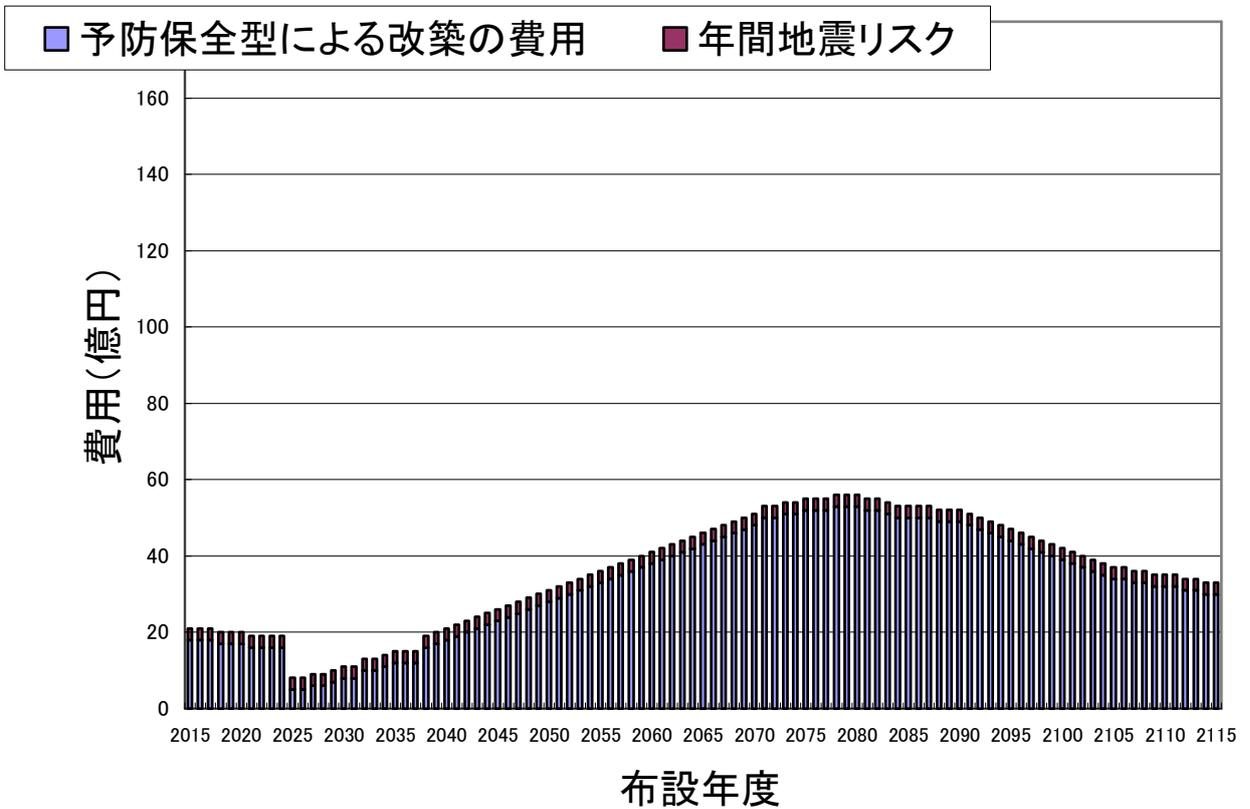


図-10 改築・更新費用：予防保全型施設管理を実施するケース（地震リスクを考慮）

参考文献

- 1) 常井友也：地震リスクを考慮した下水道管路施設のアセットマネジメントの検討事例, pp.107-109, 日本下水道協会, 2015
- 2) 国土交通省下水道部HP：大規模地震による被害想定手法及び想定結果の活用方法に関するマニュアルについて, 2015年9月1日閲覧
- 3) 遠藤 昭彦・吉川 弘道：鉄筋コンクリート橋脚に対する地震リスク評価手法の適応, 土木学会構造工学論文集, Vol.49A, 2003.3
- 4) 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会：日本の地震活動, pp.1-395, 1999.
- 5) 社団法人日本下水道協会：下水道施設耐震計算例 管路施設編 前編, pp.1-141, 2001.
- 6) 国土交通省下水道部HP：下水道長寿命化支援制度に関する手引き（案）, 2015年9月1日閲覧
- 7) 国土交通省, NETIS：<http://www.netis.mlit.go.jp/>, 2013年1月5日閲覧
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震設計編-平成8年制定, pp.1-97, 1996.
- 9) 田中修司：下水道管渠学, pp.3-84, 環境新聞社, 2001.
- 10) クボタシーアイ：<http://www.kubota-ci.co.jp>, 2013年1月5日閲覧
- 11) 一般社団法人 日本管路更生工法品質確保協会,
<http://www.hinkakukyo.jp/>, 2013年1月5日閲覧
- 12) 内閣府, http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_syuto/, 2013年1月5日閲覧
- 13) 間片博之：下水道工学, pp.71-117, 森北出版株式会社, 1993.
- 14) 村田恒雄：下水道技術キー・ポイント101選 計画・設計計算事例, pp.1-30, 株式会社山海堂, 1992.
- 15) 厚生労働省健康局水道課：水道事業の費用対効果分析マニュアル 第V編資料集, pp.1-98, 2011.
- 16) 粕谷悠紀, 善功企, 陳光斉, 笠間清伸：地震による斜面災害復旧へのリスクマネジメントの適用, 土木学会地震工学論文集29, pp.996-1001, 2007.08
- 17) 中村孝明, 中村敏治：ポートフォリオ地震予想最大損失額(PML) 評価, 日本リスク研究学会誌 12(2), pp.69-76, 2000
- 18) 篠塚正宣, 中村孝明, 望月智也；極値統計理論を用いた地震時最大予想損失額の評価手法の提案, JCOSSAR2000 論文集, pp.25-31, 2000
- 19) 国土交通省下水道部HP：
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.h, 2014年9月1日閲覧

EVALUATION OF SEWAGE PIPE BY SEISMIC RISK ANALYSIS OF LIQUEFACTION FOR ASSETMANEGEMENT

TOMOYA TSUNEI

This paper deals with an analytical method of seismic risk assessment of liquefaction for sewage pipe, and shows analytical procedures of this assessment together with numerical simulation. Also, this paper compares of the seismic risk of the small-diamter sewage pipe of $\phi 200\text{mm}$, $\phi 250$ and shield tunnel of 1800mm. Seismic risk is statistically analyzed by seismic risk curve using both data of seismic hazard analysis and seismic performance assessment. Damage cost consists of repair cost, user loss and operating losses associated with the seismic damage. This study demonstrates the proposed method can evaluate the seismic risk of sewage pipe and evaluates seismic performance level for sewage pipe for loss cost.