

下水道管路施設の地震リスク評価 に関する研究

常井 友也¹・小池 武²

¹正会員 NTTインフラネット（株） 関西支店（〒532-0033 大阪市淀川区新高3-2-6 NTT大阪三国ビル）
E-mail:tomoya-tsunei@ksi.nttinf.co.jp

²正会員 NPO 法人防災白熱アカデミー（〒658-0054 神戸市東灘区住吉宮町5丁目9-12 リーフリオレ御影101）

上下水道、地下鉄、高速道路などを中心とするライフライン施設は公益性が高く、多くは社会資本に属するものである。地震により構造物が被災すると、補修・補強、再構築費用等の損失に加え、上記の施設が利用できないことによる社会的損失等々、社会に与える影響は甚大であると推測される。そのため、高水準の安全性が必要不可欠であるが、発生確率は低く、大規模な被害を与える大地震を意識して耐震性能の水準を合わせることは経済的に効率が悪いといえる。本研究では、下水道管路施設を対象とした地震リスクの算出を小口径管路φ450mm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地中埋設管の地震リスクマネジメントを実施し、地中埋設管の耐震性能が損失コストに与える影響を考察する。

Key Words : Sewage Pipe Rehabilitation, Seismic Hazard Curve, Seismic Risk Curve, Loss Function, Seismic Performance Level

1. はじめに

地震大国である日本では、道路橋示方書、建築基準法等で定められた耐震設計は世界的にみても高水準なものであるといえる。しかし、兵庫県南部地震のような現実的に発生確率は低いが、大規模な被害を与える大地震を意識することは、その発生確率から推定すると、合理的ではないといえる。そのため、「リスク」という形でそれをより合理的に評価しようとする動きが活発化してきている。

以上のような背景をもとに、高速道路や上下水道などのライフライン施設に潜在するリスク性状を定量的、客観的に評価する手法が、研究者たちによって提案され始めている。しかし、ライフライン施設の地震リスクを実施する際、地中埋設管の耐震性能評価、被災した地中埋設管の損失コスト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、地震リスクの算出を開削工法により敷設されたφ450mm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地中埋設管の地震リスクマネジメントを実施し、地中埋設管の耐震性能が損失コストに与える影響を考察を行う。

2. 下水道管路施設の地震リスク評価

「リスク」とは、一般的に、「ある行動を行なうことにより、危険に遭遇する可能性や損失が発生する可能性」と解釈されている¹⁾。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、図-1に示すように本研究で実施する下水道管路施設の地震リスクマネジメントの評価フローについて説明する。

解析対象構造物の耐震性能評価では、本研究で採用し

た解析対象構造物のモデル化について説明し、「土木学会シールドトンネルの耐震検討」²⁾などを参考に、保有性能及び終局時の状態などの耐震性能、損傷過程を示すキャパシティースペクトルの算出を実施する。解析対象構造物のキャパシティースペクトルから知りえた限界状態変位（降伏変位、終局変位）を用いて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。

以上のように、フローは大きく3つに分けられる。

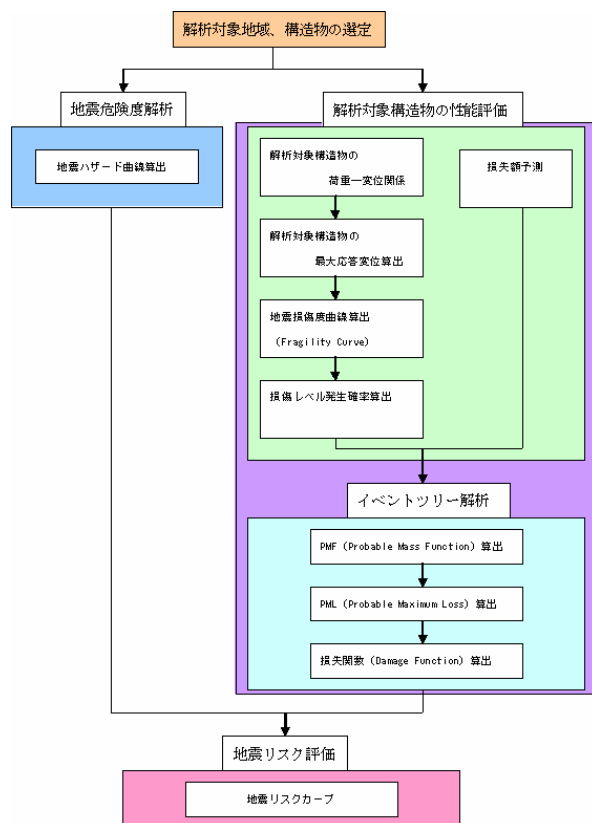


図-1 地震リスクマネジメントの評価フロー

3. 地震危険度解析

解析対象地域は、大阪府の北東部にある大阪市と京都市のほぼ中間に位置する大阪府高槻市（緯度34.5度、経度135.3度）とした。また、解析対象構造物は、日本の物流の大動脈として、産業と経済の発展に大きな役割を果たしてきた名神高速道路を解析対象とする。

(1) 地震ハザード曲線

大阪府高槻市（緯度34.5度、経度135.3度）における歴史地震カタログは、抽出期間1200年、対象半径300kmを抽出条件とし、M5～7.5までの歴史地震96個を分析対象とした³⁾。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。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⁴⁾、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。ここで、河角の方法とは、歴史地震カタログや活断層データから水平最大加速度の年超過確率を算出するものである。算出手順は、解析対象地域の歴史地震カタログから地震発生回数、抽出期間 T_n を求め、次に抽出期間 T_n を地震発生回数 n で除すことにより平均発生間隔 T_R が求まる。

$$T_R = \frac{T_n}{n} \quad (2)$$

また、平均発生間隔 T_R の逆数は、地震の年発生率 ν となる。

$$\nu = \frac{1}{T_R} \quad (3)$$

超過確率 P は、歴史地震カタログからある最大加速度 α 以上となる地震回数 $n(\alpha)$ を抽出期間内に発生したトータル地震回数で除したものとなる。

$$P = \frac{n(\alpha)}{n} \quad (4)$$

超過確率と年発生率をかけあわせることによって年超過確率 p が算出される。したがって、最大加速度と年超過確率関係を示す地震ハザード曲線を作成できる。

$$p = \nu \cdot P \quad (5)$$

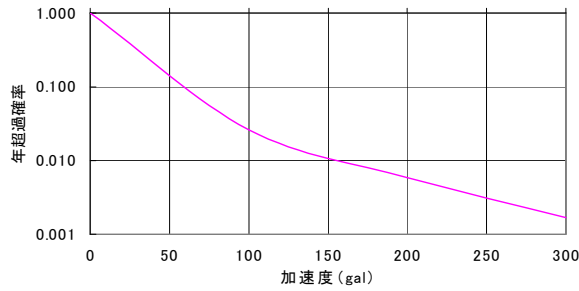


図-2 解析対象地域における地震ハザード曲線

(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 をパラメーター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。

$$h(\alpha; \lambda_\alpha, \zeta_\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_\alpha\alpha} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln\alpha - \lambda_\alpha}{\delta_\alpha}\right)^2\right] \quad (6)$$

ここで、

$$\lambda_\alpha = \ln \delta_m - \frac{1}{2}\zeta_\alpha^2 \quad (7)$$

$$\zeta_\alpha = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_\alpha^2}{\sigma_m^2}\right)} \quad (8)$$

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. 下水道管路施設の耐震性能評価

本節では、地中埋設管の地震リスク評価を実施する際の解析対象管路の耐震性能について検討を実施する。解析対象管路は、小口径管路に関しては鉄筋コンクリート管（下水道協会規格 J SWAS 規格）⁵⁾とし、大口径管路に関しては鉄鋼製のセグメントを使用したシールドトンネルを対象とする。

(1) 下水道管路施設の解析対象モデル

本研究で解析対象構造物に関しては、小口径管路は $\phi 450\text{mm}$ の管径を解析対象とし、材質は表-1に示すような鉄筋コンクリート管B型JSWAS A-1を解析対象モデルとした。鉄筋コンクリート管の照査項目は、縦断方向の継ぎ手部の拔出し長を照査項目とした。大口径管路のシールド

ドトンネルは、表-2に示すような鉄鋼製のセグメントを使用した直径 $\phi 1800\text{mm}$ を解析対象モデルとした。兵庫県南部地震などの地下鉄、上下水道、通信関係の地中埋設部の地震被害を分析した結果、 $\phi 2000\text{mm}$ 以下であると横断方向のひび割れ、破損等の地震被害が少ないことから、本研究では縦断方向のセグメントリングの継ぎ手部の目開きを照査項目とし、地震リスク分析を実施する。

表-1 下水道用鉄筋コンクリート管 B 型 JSWAS A-1 の耐震性能表⁵⁾

管径	有効長	最大拔出し長
$\phi 800\text{mm}$	2.43m	40mm

表-2 鋼製セグメントの寸法表(mm)

セグメント 外径	セグメント 幅	高さ	ボルト 本数
$\phi 1800$	750	75	18

(2) 地中埋設管の耐震性能評価

前節では鉄筋コンクリート管 B 型 JSWAS A-1、シールドのセグメントの解析対象モデルについて明記したが、本節では鉄筋コンクリート管、シールドの鋼製セグメントの耐震性能及び地震時の被害区分について示す。

地中埋設管の縦断方向の耐震設計を実施するには、地中埋設管の軸方向に沿った表層地盤の地震応答解析を行い、ある地点の表層地盤の地震時挙動を算定し、その応答値を地中埋設管に作用させることで算出することが可能となる。地中埋設管の耐震設計では、表層地盤を1自由度系に置き換えて解析するケースが多く、縦断方向の耐震耐設計では簡易的に地震時応答を求めるために、正弦波が地中埋設管を含む水平面内を水平方向に伝播するとみなすと地震時の地盤変位は下式のように表現することができる。^{2)、6)}

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi} S_v T_s \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (19)$$

ここで、

$U_h(z)$: 地震時応答変位(m)

z : 地表面からの深さ(m)

S_v : せん断弾性波速度(m/s)

T_s : 表層地盤の固有周期(s)

h : 表層地盤厚(m)

また、地震動により生じる地盤ひずみは、参考文献⁶⁾

よりガス導管耐震設計基準を用いると下式のように表すことができる。

$$\varepsilon_G = \frac{2\pi U_h(z)}{L} \quad (10)$$

ε_G : 地震動により生じる地盤ひずみ

L : 地盤振動の波長

ここで

$$L = \frac{2L_1L_2}{L_1L_2} \quad (11)$$

$$L_1 = T_s V_{DS}$$

$$L_2 = T_s V_{BS}$$

T_s : 表層地盤の固有周期

V_{DS} : 表層地盤の平均せん断弾性波速度 (m/s)

V_{BS} : 基盤面の地盤の平均せん断弾性波速度 (m/s)

また、「土木学会 シールドトンネルの耐震検討²⁾」を参考するとシールドトンネルの縦断方向の耐震設計に関しては、上式で示した地震動により生じる地盤ひずみ ε_G は、セグメントリング継ぎ手 1 箇所が発生する地盤変位がセグメント幅に相当する地盤ひずみの総和として表現することができる。したがって、セグメントにリング継ぎ手に生じる目開き量 Δ は、セグメントの幅 B すると下式のように表現することができる。

$$\Delta = \varepsilon_G \cdot B \quad (12)$$

ここで、

ε_G : 地震動により生じる地盤ひずみ

B : セグメントの幅

このセグメントにリング継ぎ手に生じる目開き量 Δ は、シール材の耐水性能と比較することで止水性の照査を行うことができる。

なお、本研究では、表層地盤を 1 自由度系に置き換えて応答解析を実施しており、応答地にばらつきがあるため、応答値に補正係数を乗じている。⁸⁾

また、被害区分の設定は、参考文献^{2)、5)}に示されている判定基準を参考に耐震性能の被害区分の設定を行う。本研究では、鉄筋コンクリート管に関しては縦断方向の

継ぎ手部の拔出し長を判定基準とし、シールド工法に関してはセグメントリングのリング継ぎ手に生じる目開きを判定基準とした。「鉄筋コンクリート管の継手ズレ」、「セグメントリングのリング継ぎ手」に関しては表-3、表-4 の被害区分のように、a、b、c の 3 ランクの被害区分として設定する。また、シールドトンネルが被災することによって生じる 3 つの被害区分 a、b、c に関して詳細な被害状況を表-5 に示す。

上記より、表-6 に地盤条件、図-3 に入力地震動の速度応答スペクトル、図-4 に地中埋設管の耐力曲線を示す。

表-3 鉄筋コンクリート管の被害区分²⁾

被害区分	鉄筋コンクリート管	補修の方法
a	4cm 以上	新規建設による改築を行う
b	2～4cm 以上	更生工法による補修を行う
c	2cm 未満	補修や改良は必要としない

表-4 シールドトンネルのセグメントの被害区分²⁾

被害区分	セグメント	補修の方法
a	5mm 以上	更生工法による補修を行う
b	2～5mm 以上	部分補修を実施する
c	2mm 未満	補修や改良は必要としない

表-5 シールドトンネルの機能に対する被害区分

被害区分	機能に対する被害度の区分	部材の被害状況
c	被害度 0	降伏点、強度の 85% 以内
	被害度 I	部材の降伏点、強度以内
b	被害度 II	部材の耐力以内
a	被害度 III	断面の崩壊以内

表-6 地盤条件⁵⁾

No	土質区分	層厚 Hi (m)	平均N値
1	砂質土	0.5	2
2	砂質土	2.8	5
3	粘性土	1.9	3
4	砂質土	6.0	10
5	粘性土	9.5	2
6	砂質土	4.0	12
合計	-	24.7	-

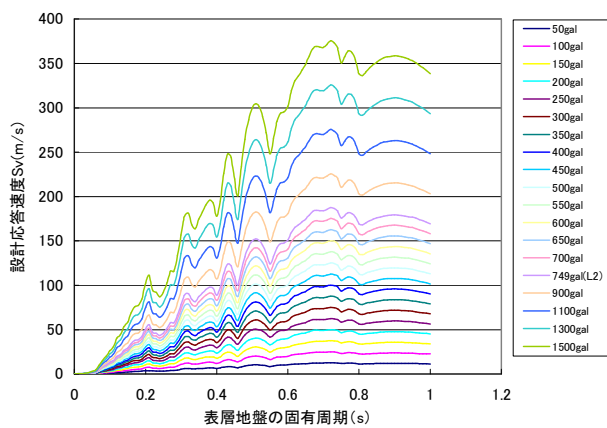


図-3 入力地震動の速度応答スペクトル

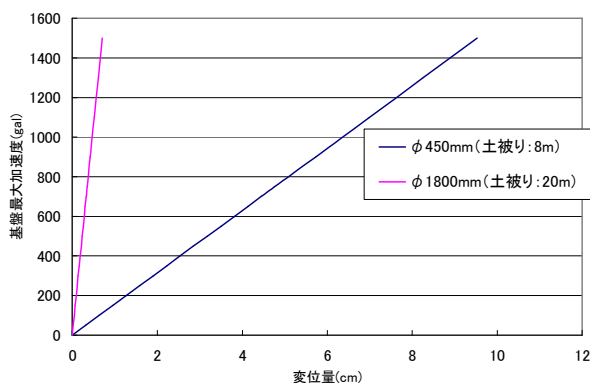


図-4 地中埋設管の耐力曲線

(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-7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。また、シールドトンネルに関しても、補修補強を実施することによって構造物としての機能を復旧することが可能である状態であり、止水材

によるクラック等の部分補修を実施するものとする。ランクaに判定された場合は、管きよが脱却していることにより、継ぎ手部から土砂などが管きよ内に流入し構造物の機能を復旧できない状態であるため更生工法による補修補強が不可能であるため開削工法により敷設を行う。また、シールド工法に関してはセグメントリングのリング継ぎ手の目開きが、構造上問題であり更生工法による補修補強を実施するものとする。

表-8 に地中埋設管の補修・補強工法を示す。φ450mmの更生工法には、自立管として性能を有する「オールライナー工法」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「グラントビーバーシステム」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。

また、表-9 に示すように、参考文献より東京都下水道局が管理を実施している公共下水道及び流域下水道の管径別管きよ管理延長を示す。地震リスクの算出にあたっては、東京都区部をモデルケースとし、東京都区部におけるφ450mm、φ1800mmの延長を参考に補修費、補強費用、調査費用の物理的損失の算出を実施する。

表-7 地中埋設管の補修・補強費
(1mあたりの費用)^{7), 9)}

管径	φ450mm		φ1800mm		カメラ調査
	更生工法	開削工法	止水材	更生工法	
管径 (mm)	φ450	φ450	φ1800	φ1500	-
工事費 (円/m)	50,000	-	32,000	236,000	6,800
経費込み (1mあたり)	80,000	150,000	59,000	432,000	12,000

表-8 地中埋設管の補修・補強工法^{7), 10)}

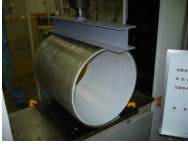
更生工法 (新工法：φ 450mm)	止水材 ⁴⁾	更生工法 ⁴⁾ (ダンビー：φ 1800mm)
		

表-9 東京都区部の管径別管きょ管理延長¹¹⁾

管径 (mm)	延長 (m)	管径 (mm)	延長 (m)
～ 250	6,159,397	～ 1,200	416,299
～ 300	2,022,432	～ 1,500	445,746
～ 350	1,106,188	～ 2,000	619,342
～ 400	957,558	～ 2,600	381,586
～ 500	616,184	～ 2,800	83,483
～ 600	830,698	～ 3,000	65,311
～ 700	585,897	～ 3,500	124,144
～ 800	447,758	～ 4,000	107,010
～ 900	310,196	～ 5,000	101,588
～ 1,000	262,350	合計	15,643,167

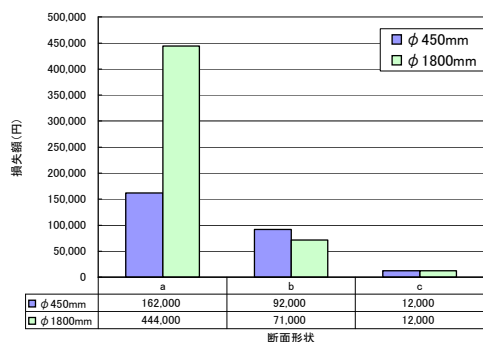
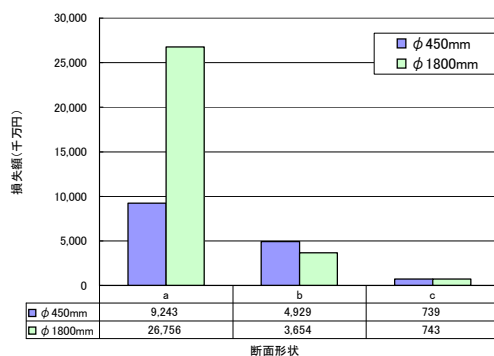


図-5 地中埋設管の補修費用 (1mあたりの補修単価)

図-6 地中埋設管の補修費用
(管路延長に対する補修費用)

b) 機能不全による営業損失

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、東京都下水道局の実績¹³⁾と参考文献^{14), 15)}を参考に算出を行う。本研究では、一世帯5人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¹⁶⁾。したがって、一世帯5人家族で一月あたりの給水量は、表-10が示すように30.6 (m³/世帯・月)¹⁷⁾となり、下水道使用料金は表-11が示すように1 m³につき170円となる。

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φ450mm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^{14), 15)}を基に、管きょ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。

$$\text{設計流量} = \frac{\text{排水（集水）面積} \times \text{単位汚水量 (m}^3/\text{秒/ha)}}{\text{+地下水+余裕量}} \quad (13)$$

また、余裕量に関しては、計画時間最大汚水量に対して表-12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、管きょ勾配に関しては、参考文献^{14), 15)}から表-13に示すような勾配を用いることとする。

管きょ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下表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。したがって、地震被害による30日の機能不全による営業損失は、表-14に示すようにφ450mmに関しては3084万円、φ1800mmに関しては109064万円となる。

表-10 東京都水道局 平成18年 生活用水実態調査¹⁷⁾

世帯人員	1人	2人	3人	4人	5人	6人以上
使用水量 (m ³ /世帯・月)	7.8	16.2	21.6	26.3	30.6	35.6

表-11 東京都下水道局 下水道使用料金表¹³⁾

汚水の種別	排出量(m ³)	料率(円)
一般汚水	8m ³ 以下の分	560円
一般汚水	8m ³ を超え20m ³ 以下の分	1m ³ につき110円
一般汚水	20m ³ を超え30m ³ 以下の分	1m ³ につき140円
一般汚水	30m ³ を超え50m ³ 以下の分	1m ³ につき170円
一般汚水	50m ³ を超え100m ³ 以下の分	1m ³ につき200円
一般汚水	100m ³ を超え200m ³ 以下の分	1m ³ につき230円
一般汚水	200m ³ を超え500m ³ 以下の分	1m ³ につき270円
一般汚水	500m ³ を超え1000m ³ 以下の分	1m ³ につき310円
一般汚水	1000m ³ を超える分	1m ³ につき345円

表-12 下水道管の断面の余裕率^{14)、15)}

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-13 下水道管の代表的な勾配・流速・流量^{14)、15)}

管径	污水管			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-14 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)
φ450mm	0.070	3
φ1800mm	2.475	109

c) ユーザー損失

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¹⁶⁾。

表-15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、φ450mm、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^{14)、15)}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-16に示すようにφ450mmに関しては118千円、φ1800mmに関しては4157千円となる。

表-15 使用用途別の物品・サービス購入費用¹⁶⁾

使用用途	代替となる物品・サービス	単価(円/個)	1人1日当り使用回数(回/人・日)	1人1日当り購入費用(円/人・日)	販売価格(円/個)	販売数量(1数量/個)	単価(1数量/個)
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	クエークタオル	16	4	朝昼夕各1回	64	480	30
	シャンプー	16	2	朝夕各1回	32	480	30
食事	ボトルドウォーター	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	上着上下1人分	2,000	2,000	1
全体	-	-	-	-	4998	-	-

表-16 ユーザー損失額^{14)、15)}

管径	汚水量(m ³ /s)	被害人口(人)	被害日数(日)	1人1日当り被害額原単位(円/人・日)	経済損失額(千円)
φ450mm	0.140	7838	30	4998	118
φ1800mm	3.713	277215	30	4998	4157

6. 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 $\delta_L(\alpha)$ とすると、応答変位 $\delta_R(\alpha)$ が限界状態変位 $\delta_L(\alpha)$ 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_f は限界状態変位 $\delta_L(\alpha)$ 、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。

$$X = \frac{\delta_K(\alpha)}{\delta_R(\alpha)} \quad (14)$$

$$P_f = P(X) \quad (15)$$

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。生起確率の算出に用いる変動係数は参考文献^{16), 17)}を参考に一律、0.3とした。

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。

$$P_f = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_X x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda_x}{\delta_x}\right)^2\right] dx \quad (16)$$

$$\lambda_X = \ln \delta_K - \ln \delta_{resp} \quad (17)$$

$$\zeta_X = \sqrt{\ln\left\{(1+\nu_K)^2 \cdot (1+\nu_R)^2\right\}} \quad (18)$$

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数を表す。

次に、積分関数を以下のように変数変換を行なうと

$$z = \delta_{resp} \cdot x \quad (19)$$

となり、上式を微分すると

$$dz = \delta_{resp} \cdot dx \quad (20)$$

であるから、 P_f は以下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となる。

$$P_f = \int_0^{\delta_{resp}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_X z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \lambda_x}{\delta_x}\right)^2\right] dz \quad (21)$$

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_1 、 F_2 を求めることができる。ここで、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。解析対象シールド

トンネルの地震損傷度曲線 (Fragility Curve) を図-7、図-8 に示す。

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。

$$Prob(c_1|\alpha) = 1 - F_1(\alpha) \quad (22)$$

$$Prob(c_2|\alpha) = F_1(\alpha) - F_2(\alpha) \quad (23)$$

$$Prob(c_3|\alpha) = F_2(\alpha) \quad (24)$$

損傷レベル発生確率と基盤最大加速度の関係を表したものを図-9、図-10に示す。損傷レベル発生確率 $Prob(c_i|\alpha)$ は、基盤最大加速度が増加するにつれて高次損傷レベルが発生する生起する傾向にある。

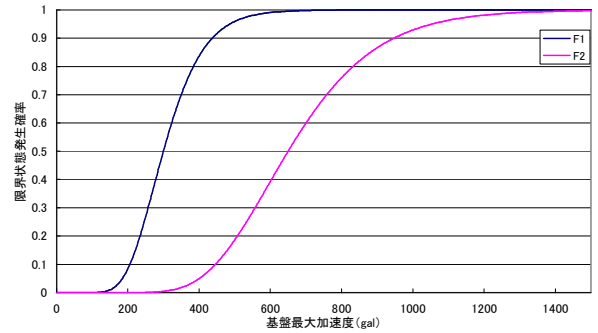


図-7 Fragility Curve (φ450mm)

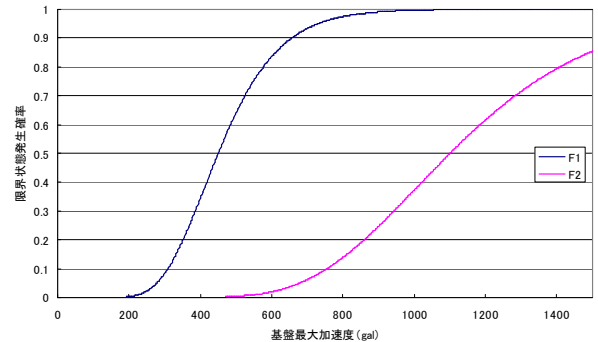


図-8 Fragility Curve (φ1800mm)

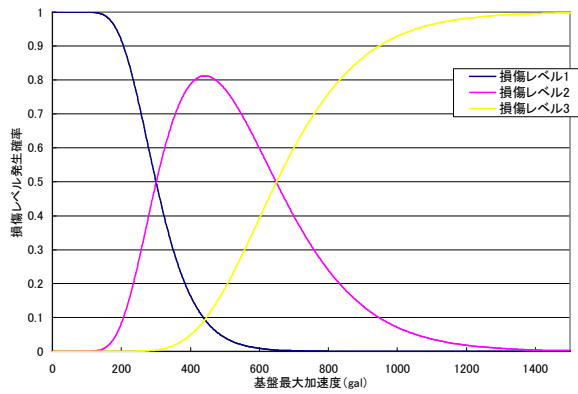


図-9 限界状態発生確率 (φ 450mm)

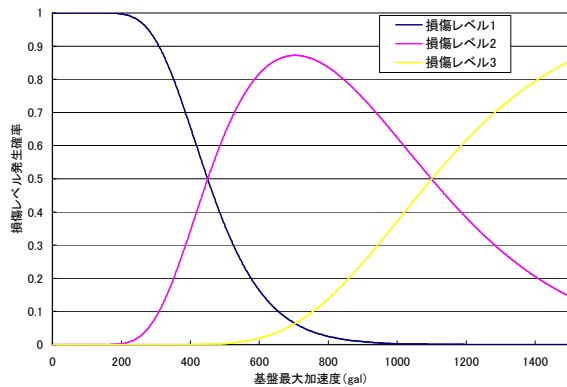


図-10 限界状態発生確率 (φ 1800mm)

(2) イベントツリー解析

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、発生確率と損失額の関係を確認するための手段としてイベントツリーが用いられる。イベントツリー解析とは、ある事象、つまり地震動が発生した際、発生する被害要因を想定し、それぞれの経路の発生確率、損失額を算出する解析手法のことである。本研究においては、被害要因を曲げ破壊に限定し、本研究で用いるイベントツリーを図-11に示す。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。

$$c_m = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \text{prob}(c_i|\alpha) \quad (25)$$

$$\sigma_c^2 = \sum_{i=1}^n (c_i - c_m)^2 \cdot \text{prob}(c_i|\alpha) \quad (26)$$

事象	被害要因	被災度	発生確率	損失額
	抜出し			
地震動 α (cm/s^2)	→	a	$\text{Prob}(c_1 \alpha)$	c_1
		b	$\text{Prob}(c_2 \alpha)$	c_2
		c	$\text{Prob}(c_3 \alpha)$	c_3

図-11 イベントツリー

(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。β分布とは下記に示すような確率密度関数 $f(c; q, r|\alpha)$ であり、 q 、 r は分布のパラメーターである。 $B(q, r)$ 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。

$$f(c; q, r|\alpha) = \frac{1}{B(q, r)} \cdot \frac{(c-a)^{q-1} \cdot (b-c)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}} \quad (27)$$

$$q = -\frac{\mu_x - a}{\mu_x - b} r \quad (28)$$

$$r = \frac{\frac{-\frac{\mu_x - a}{\mu_x - b} (b-a)^2}{\left(-\frac{\mu_x - a}{\mu_x - b} + 1\right)^2 \times \sigma_x^2} - 1}{1 - \frac{\mu_x - a}{\mu_x - b}} \quad (29)$$

$$B(q, r) = \frac{\Gamma(q)\Gamma(r)}{\Gamma(q+r)} \quad (30)$$

また、β分布の超過確率 $R(c|\alpha)$ 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。

$$R(c|\alpha) = \int_c^{c_{\max}} f(x; r, q|\alpha) dx \quad (31)$$

(4) 損失関数

損失関数 (Damage Function) または地震ロス関数 (Seismic Loss function) とも呼ばれており、損失期待値NEL (Normal Expected Loss)、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り、図-12～図-15に示す。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。

図-12 は、1m 当たりの補修費用から損失額を算出したものであり、小口径管路とシールドトンネルのような大口径管路を比較すると、約 900gal (レベル2地震動) 以下の地震動の場合であれば、シールドトンネルのような大口径の方が、損失額が低い地震に対して優位性

が高いと判断できる。一方で、レベル2地震動以上の場合は、大口径管路の方が、損失額が大きくなる。

一方で、図-13 は、機能不全による営業損失のみを考慮した際の損失額を算出したものであるが、小口径管路とシールドトンネルのような大口径管路を比較すると、550gal 以下の地震動であれば、シールドトンネルのような大口径の方が、多少損失額が低い地震に対して優位性が高いが、550gal を超えると大口径管路の方が大幅に損失額が大きくなり高い損失が生じることになる。

図-14 は、東京都区部の管路延長から補修・補強、機能不全による営業損失を考慮した際の損失額であり、小口径管路とシールドトンネルのような大口径管路を比較すると、約 900gal（レベル2地震動）以下の地震動の場合であれば、シールドトンネルのような大口径の方が、損失額が低い地震に対して優位性が高いと判断できる。一方で、レベル2地震動以上の場合は、大口径管路の方が、損失額が大きくなる。

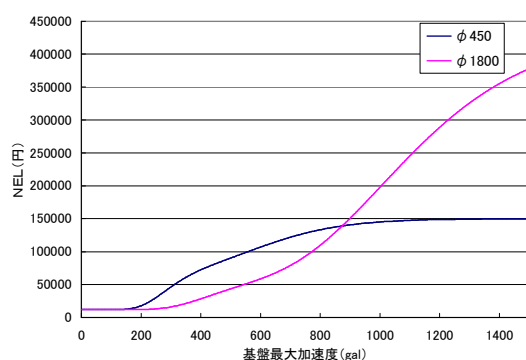


図-12 損失額（φ450、φ1800mm）：1m当たりの補修費

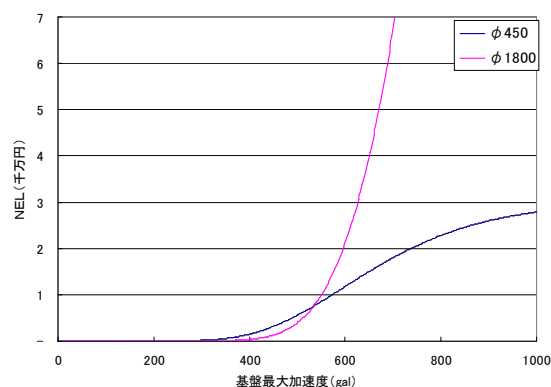


図-13 損失額（φ450、φ1800mm）：機能不全による営業損失

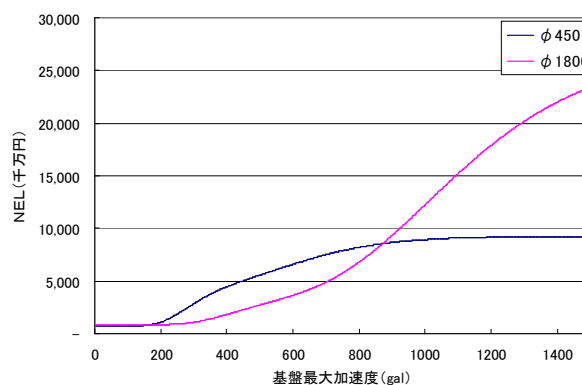


図-14 損失額(450mm、φ1800mm)：管路延長に対する補修費+機能不全による営業損失

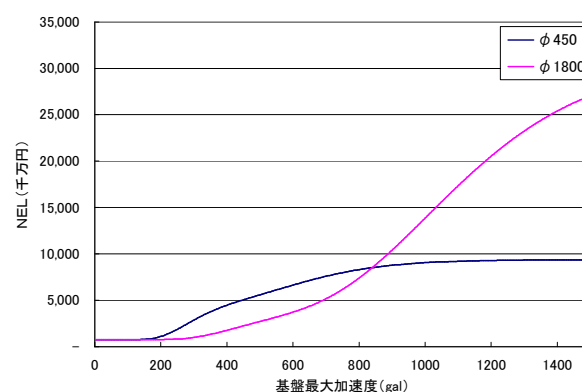


図-15 損失額(450mm、φ1800mm)：管路延長に対する補修費+機能不全による営業損失+ユーザー損失

(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。

$$\Omega(c|\alpha_m) = \int_0^{\infty} h(\alpha; \lambda_\alpha, \zeta_\alpha) \cdot R(c|\alpha) d\alpha \quad (32)$$

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。

$$G(c) = \int_0^{\infty} p(\alpha_m) \cdot \Omega(c|\alpha_m) d\alpha_m \quad (33)$$

図-16～図-19 に示すように、地震リスクカーブは損失額の増加に伴い年超過確率が減少する単調減少のグラフであることがわかる。図-16 は、1m 当たりの補修費用から地震リスクカーブを算出したものであるが、小口径

管路とシールドトンネルのような大口径管路を比較すると、損失額が 150,000 円以下の場合、超過確率がシールドトンネルの方が低いため、地震に対して優位性が高いと判断できる。

一方で、図-17 は、機能不全による営業損失のみを考慮した際の地震リスクカーブを算出したものであるが、小口径管路とシールドトンネルのような大口径管路を比較すると、どの損失額においても超過確率がシールドトンネルの方が高いため、大口径管路が地震に対して優位性が高いと判断することはできない。

また、図-18 は、東京都区部の管路延長から補修・補強、機能不全による営業損失を考慮した際の地震リスクカーブであり、小口径管路とシールドトンネルのような大口径管路を比較すると、損失額が 9 千万円以下の場合、超過確率がシールドトンネルの方が低いため、地震に対して優位性が高いと判断できる。

さらに、図-19 は、東京都区部の管路延長から補修・補強、機能不全による営業損失とユーザー損失を考慮した場合においても、補修・補強、機能不全による営業損失を考慮した場合と同様の結果が得られた。

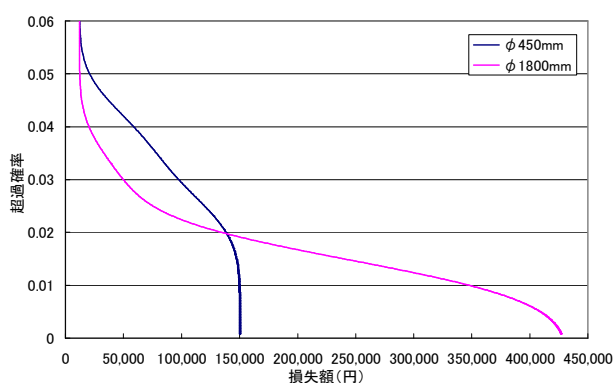


図-16 地震リスクカーブ（全損失）：1m当たりの補修費

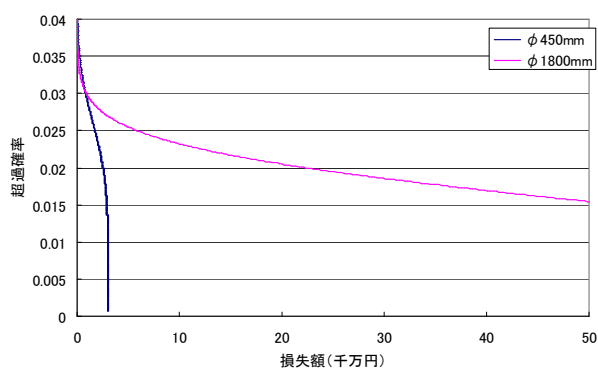


図-17 地震リスクカーブ（全損失）：機能不全による営業損失

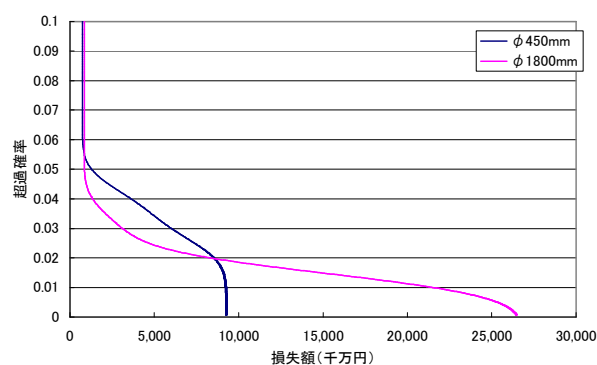


図-18 地震リスクカーブ（全損失）：管路延長に対する補修費＋機能不全による営業損失

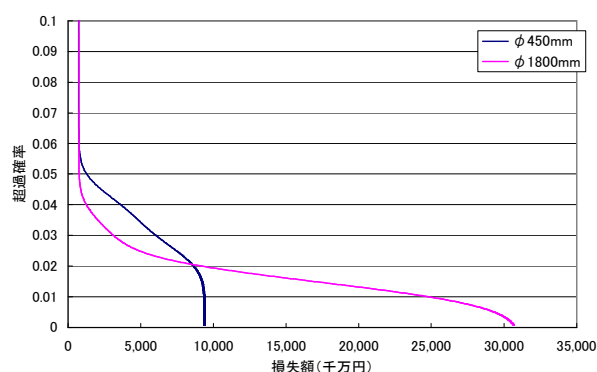


図-19 地震リスクカーブ（全損失）：管路延長に対する補修費＋機能不全による営業損失＋ユーザー損失

7. 結論

本研究では、被災した地中埋設管にかかる補修・補強、再構築の損失額と機能不全による営業損失を算出し、これらの情報を基に地中埋設管の地震リスクマネジメントを実施し、地中埋設管の耐震性能の違いが損失コストに与える影響を検討した。

機能不全による営業損失のみを考慮した場合、小口径管路とシールドトンネルのような大口径管路を比較すると、550gal 以下の地震動であれば、小口径管路と比較してシールドトンネルのような大口径の方が、多少損失額が低いため地震に対して優位性が高いが、550gal を超えると大口径管路の方が大幅に損失額が大きくなり高い損失が生じることになる。

補修・補強、再構築の損失額と機能不全による営業損失を考慮した場合、損失額と基盤最大加速度の関係から、約900gal以下（レベル2地震動以下）の地震動であれば大口径管路より小口径管路の方が損失額が大きくなる。すなわち、約900gal（レベル2地震動）以上の地震が現実的に発生する可能性は極めて低いため、φ 800mm以下

の小口径管路（枝線）とシールドトンネルのような大口径管路（幹線）の耐震対策の優先順位を考えるとすると、小口径管路の耐震対策を優先的に実施していくことで地中埋設管の地震リスクを全体的に低減することが言える。小口径管路は、地震による被害を受けやすく構造物としての機能を復旧することが困難であるため、シールド工法のような大口径管路補修、補強に要する費用が多いため損失額が大きくなる。

また、補修・補強、再構築の損失額、機能不全による営業損失とユーザー損失を考慮した場合、約900gal以下（レベル2地震動以下）の地震動であれば大口径管路より小口径管路の方が損失額が大きくなり、補修・補強、再構築の損失額と機能不全による営業損失を考慮した場合と同じ結果となった。

現実的には、上下水道、ガス、電力などのライフライン施設においては、シールドトンネルのような大口径管路の幹線管路の耐震対策を優先的に実施しているケースが極めて多いが、今後は小口径管路の優先順位を上げて耐震化計画を進める必要がある。

参考文献

- 1) 星屋勝、中村孝明：構造物の地震リスクマネジメント、山海道、2002.
- 2) 土木学会：シールドトンネルの耐震検討、丸善株式会社、2007.
- 3) 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、1999.
- 4) 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
- 5) 社団法人日本下水道協会：下水道施設耐震計算例、2001.
- 6) 高田至朗：ライフライン地震工学、共立出版株式会社、1997.
- 7) 国土交通省、新技術情報提供システム：<http://www.netis.mlit.go.jp/>、2013年1月5日
- 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、1996.
- 9) 田中修司：下水道管渠学、環境新聞社、2001.
- 10) クボタシーアイ：<http://www.kubota-ci.co.jp>、2013.
- 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.
- 12) 内閣府、http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_syuto/、2013年1月5日
- 13) 東京都下水道局：<http://www.gesui.metro.tokyo.jp>、2013.
- 14) 間片博之：下水道工学、森北出版株式会社、1993.
- 15) 村田恒雄：下水道技術キー・ポイント101選 計画・設計計算実例、株式会社山海堂、1992.
- 16) 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、2011.
- 17) 東京都水道局：<http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/>、2013年1月5日

(2013.9.19 受付)

EVALUATION OF SEWAGE PIPE BY SEISMIC RISK ANALYSIS

Tomoya Tsunei, Takeshi Koike

This paper deals with an analytical method of seismic risk assessment 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-diameter sewage pipe of $\phi 450\text{mm}$ 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.