

震災時の緊急物資輸送ルートの特徴論的リスク評価

Probabilistic Seismic Risk Assessment of Emergency Supplies Transportation Routes

喜納 啓¹, 矢代 晴実², 鳥沢 一晃³, 福島 誠一郎⁴, 堀口 俊行⁵
 Satoshi KINA¹, Harumi YASHIRO², Kazuaki TORISAWA³,
 Sei'ichiro FUKUSHIMA⁴ and Toshiyuki HORIGUCHI⁵

¹ 横浜国立大学院 都市イノベーション学府

Institute of Urban Innovation, Yokohama National University

^{2,5} 防衛大学校 建築環境工学科

Department of Civil and Environmental Engineering, National Defense Academy

³ 鹿島建設株式会社 技術研究所

Technical Reserch Institute, Kajima Corporation

⁴ リスク工学研究所(株)

Institute of Risk Engineering

Although concrete measures of elimination of road obstacles are preparing in case a capital directly under earthquake in japan, it only take into account southern part of Tokyo, but that's the very reason why it needs to be considered for a variety of hypocenter. The purpose of this paper is to propose probabilistic seismic risk assessment, which take into account a number of hypocenters, based on vulnerability and loss function of every road facilities, so it show compared analysis results of seismic risk of route in capital for urgent transportation plan in earthquake.

Keywords : a great earthquake, emergency supplies transportation , road facilities, restoration period, risk curve

1. はじめに

大規模地震が発生したとき、被害が甚大な地域へ緊急物資等の輸送が迅速かつ円滑に行なわれるように、輸送ルートの確保が重要である。わが国では首都直下地震や南海トラフ地震など巨大地震の発生が懸念されており、それらに備えて具体的な道路啓開計画策定が進められているが、例えば首都直下地震には都心南部直下地震以外のケースは考慮されておらず¹⁾、今後、様々な震源を想定した検討がされることになっている²⁾。一方、複数の震源の発生確率を考慮して道路施設の損失を評価する方法は近年提案されているが例えば³⁾、具体的な輸送ルートを対象にリスクカーブを算出して、複数ルートの地震リスクを比較した事例はあまり見られない。

そこで、本研究では、震災時の物資輸送計画に資することを目的に、輸送ルートに影響を与えるすべての震源を考慮して、道路施設ごとの脆弱性（フラジリティ）に基づき、ルートの損失を確率論的に評価した事例を報告する。はじめに、地震リスク評価法と施設別損失関数の設定について概説した後、首都圏におけるルートの地震リスク比較に関する解析事例を示す。

2. リスク評価法

広域に散在する施設を対象としたポートフォリオ地震リスク解析（以下、ポートフォリオ解析）によって、輸送ルートのリスク評価を行なった。ポートフォリオ解析にはいくつか手法があるが、本研究では、多数のシナリオ地震を想定して、損失と地震の発生確率からイベントリスクカーブを求める手法を用いた。ここで、イベントリスクカーブとは、地震イベント（以下、イベント）ごとにポートフォリオの条件付き損失を求め、横軸に損失、

縦軸に損失の超過確率を取った曲線である。なお、地震動や被害率評価の不確実性を考慮するため、距離減衰式や構造物の耐力のばらつきに基づき、モンテカルロサンプリングを発生させ、損失の確率分布を評価した。以上の評価フローを図1に示す。

また、ルートの地震による損失として、損傷箇所数と復旧期間を評価することにした。ルート全体の損傷箇所数については、ルート内の各施設に生じる損傷箇所数の総和を取って求める。一方、ルート全体の復旧期間は、現実には復旧人員・資機材をどこに優先的に投入し、作業にどの程度時間を要するかで変わるが、本研究では多数の地震に対してそれぞれ復旧期間を算出するため、単純な仮定を置いて評価することにした。すなわち、すべての復旧作業は同時に開始し、最短の期間で完了するものとして、ルート内の各施設における復旧期間の最大値を用いることにした。

3. 施設別損失関数の設定

ルートを構成する施設として、盛土、高架橋、橋梁、トンネルを対象に損失（損傷箇所数と復旧期間）を評価することにした。

具体的には、施設種別 i ($i=1$: 盛土, $i=2$: 高架橋, $i=3$: 橋梁, $i=4$: トンネル) のフラジリティ関数から得られる被害ランク j ($j=1$: 無被害, $j=2$: 小破, $j=3$: 中破, $j=4$: 大破) の発生確率 $\Delta p_{ij}(\mathbf{a})$ と被害ランクに対応する損失 k ($k=1$: 損傷箇所数, $k=2$: 復旧期間) の値 L_{ijk} を用いて、式(1)に示す期待損失関数 $F_{ijk}(\mathbf{a})$ として定義する。説明変数 \mathbf{a} は地震動強さである。

$$F_{ijk}(\mathbf{a}) = \sum L_{ijk} \cdot \Delta p_{ij}(\mathbf{a}) \quad (1)$$

以下に、本研究の解析事例で用いる施設別の期待損失

関数の設定について概説する。

盛土、高架橋、橋梁の脆弱性関数については、施設別の耐震性に係る既往研究に基づき検討した事例⁴⁾があり、それを参考にした。なお、既往研究では施設の構造特性の違いのために脆弱性関数に用いられる地震動指標が異なる場合があるが、ここでは計算が煩雑になるのを避けるため、地震動指標間の経験的な関係⁵⁾を用いて地表最大加速度PGAに換算して統一した。設定した脆弱性関数を図2に示す。トンネルについては過去の地震でほとんど被害が生じていない⁶⁾ことから、ここでは損傷しないと仮定した。

被害ランクに対応する損傷箇所数[箇所/km]は、盛土については文献4に基づき小破0.18、中破0.57、大破1.81とし、高架橋についても同文献の検討を参考に、小破0.10、中破0.31、大破0.81とした。橋梁については被害ランクと損傷発生率[箇所/箇所]を対応付けることにし、文献7を参考に小破0.3、中破1.0、大破1.0と設定した。

一方、被害ランクに対応する復旧期間に関しては過去に検討した事例が少ないため、関連する既往研究を参照

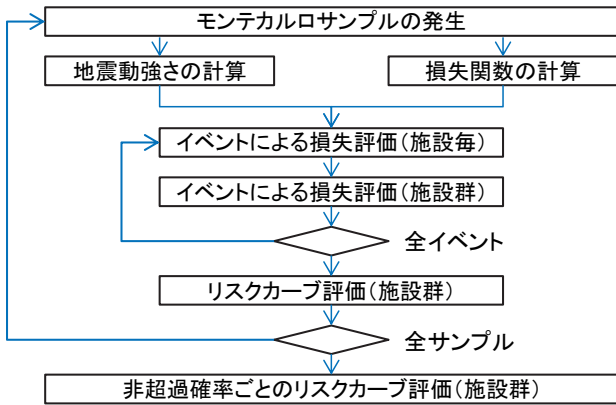


図1 ポートフォリオ地震リスク評価フロー

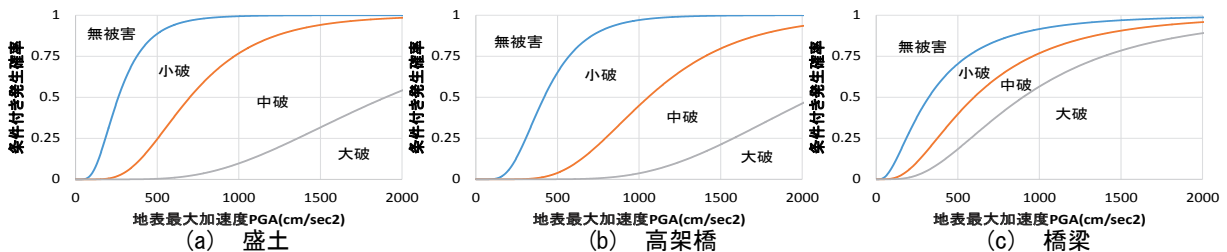


図2 解析事例で用いる施設別の脆弱性関数

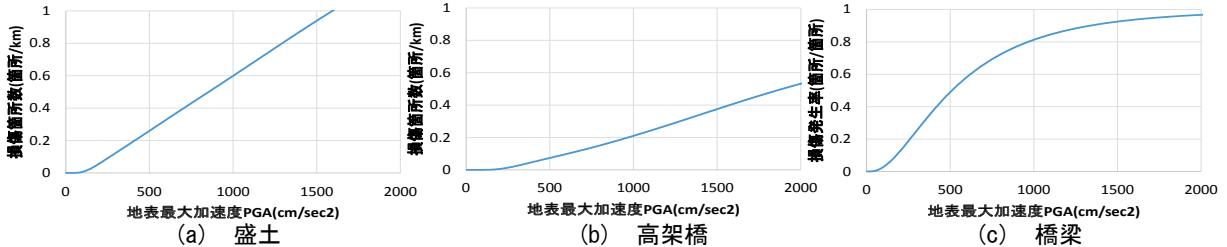


図3 解析事例で用いる損失関数（損傷箇所数）

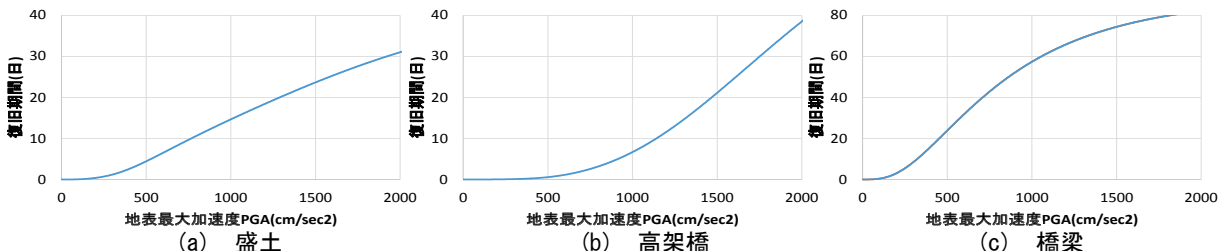


図4 解析事例で用いる損失関数（復旧期間）

して、施設種別間の整合性にも配慮しながら設定した。

盛土については文献8を参考に小破1日、中破15日、大破45日とした。また、高架橋および橋梁については文献7を参考に小破3日、中破30日、大破90日とした。

以上の検討に基づき評価した損傷箇所数と復旧期間に係る期待損失関数をそれぞれ図3および図4に示す。

4. 解析対象

例題として、郊外の輸送拠点から都心の物資集積拠点までの物資輸送として、起点を厚木市役所、終点を品川トラックターミナルとした輸送ルートを想定した。また、その経路として使用する高速道路、直轄国道、都県道等の組み合わせ方が異なるルートを複数設定し、それらの地震リスクを比較することにした。設定したルートを図5および表1に示す。なお、ルートを構成する施設種別の抽出は、Google Map等の衛星写真や道路地図、地形図等に基づき判読して行なった。各ルートの施設比率を表2にまとめた。

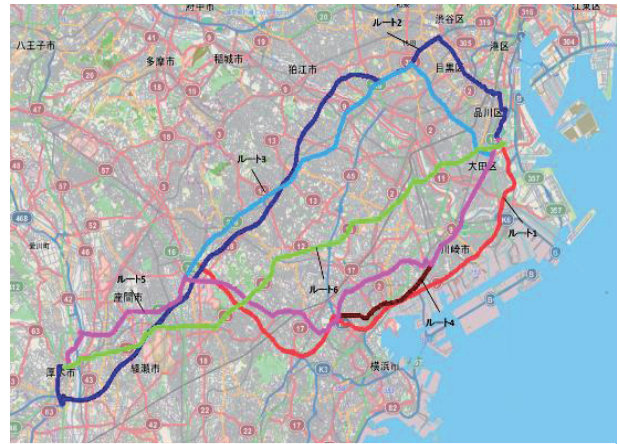


図5 解析対象ルートの経路配置

表1 解析対象ルートの主要通過道路

	主要通過道路
ルート1	東名高速道路、国道16号、横浜新道、首都高速神奈川1号
ルート2	東名高速道路、中央環状線、首都高速3号渋谷線
ルート3	国道246号、都道318・316号
ルート4	国道246号、八王子街道、国道1号、国道15号
ルート5	国道246号、八王子街道、水道道、国道1号、国道15号
ルート6	中原街道、緑産業道路

表2 解析対象ルートの構成施設の延長・比率

	盛土		高架橋		橋梁		総延長(km)
	延長(km)	比率(%)	延長(km)	比率(%)	延長(km)	比率(%)	
ルート1	28.288	48.58	22.02	37.82	6.282	10.79	58.219
ルート2	41.25	72.92	11.062	19.55	3.971	7.02	56.563
ルート3	37.717	76.78	8.793	17.9	1.779	3.62	49.118
ルート4	43.066	86.79	4.277	8.61	1.495	3.01	49.618
ルート5	42.975	86.77	4.229	8.66	1.495	3.06	48.832
ルート6	41.665	94.96	1.188	2.7	0.808	1.84	43.872

輸送ルートのポートフォリオ地震リスク解析に用いる地震環境については、日本建築学会荷重指針2004の地震モデル(Annaka and Yashiro⁹⁾)を用いた。また、距離減衰式についても同文献に従い、Kanno et al.¹⁰⁾の式を用いた。

(1) 損傷箇所数のリスクカーブに基づく検討

対象ルートで損傷箇所数を指標としたリスクカーブを、図3の損失関数に基づき算出した。各ルートの非超過確率10%、50%、90%の損傷箇所数のリスクカーブを図6に示す。これより、各ルートで傾向に多少の違いがあることが分かる。

まず、期待値を算出し、ルートの比較を行なった。各非超過確率での期待損傷箇所数を表3に示す。これより、いずれの非超過確率においても、ルート3が最小となり、ルート5が最大である。各ルートの期待損傷箇所数の差は、各ルートで延長が長い盛土の影響を大きく受けると考えられる。一方、ルート1は高架橋と橋梁の延長が他のルートに比べて長いこと、その影響が期待損傷箇所数に現れたと考えられる。

次に、非超過確率50%のリスクカーブを用いて、一定の年超過確率値での損傷箇所数に基づき、ルートの比較を行なった。すべてのルートの非超過確率50%の損傷箇所数のリスクカーブを重ね書きしたものを図7に示す。これより、いずれの年超過確率においても、ルート3が最小で、ルート5が最大となることには変わらないが、各ルートの順位には変化があることが分かる。着目する年超過確率によってリスクの高いルートの順位が変わることから、想定地震の再現期間に応じた輸送ルート選択や復旧対策の事前情報としての活用が期待できる。

表3 各ルートの非超過確率毎の期待損傷箇所数[箇所]

	ルート1	ルート2	ルート3	ルート4	ルート5	ルート6
90%	0.388	0.402	0.299	0.382	0.434	0.366
50%	0.352	0.366	0.264	0.344	0.397	0.326
10%	0.315	0.328	0.231	0.303	0.351	0.291

(2) 復旧期間のリスクカーブに基づく検討

対象ルートで復旧期間を指標としたリスクカーブを、図4の損失関数に基づき算出した。すべてのルートの非超過確率50%の復旧期間のリスクカーブを重ね書きしたものを図8に示す。これより、復旧期間のリスクカーブは前述した損傷箇所数のそれとは異なり、いずれのルートについてもほぼ同様の傾向にあることが分かる。

そこで、ルート1を例にして、ルートを構成する施設ごとに復旧期間のリスクカーブを算出したものを図9に示す。

図に青線で示したものは橋梁の復旧期間のリスクカーブである。すなわち、構成施設のうち橋梁がルートの復旧期間に与える影響が支配的であり、ボトルネックとなることが分かる。この傾向は他のルートについても同様であった。

ボトルネック解消によって、ルートの復旧期間がどのように変化するかを把握するため、構造補強を行なったケースを想定し、結果の比較を行なった。ここでは、1) 補強前の現状、2) 高架橋のみ補強、3) 橋梁のみ補強、4) 高架橋・橋梁同時補強の4ケースについて検討した。補強のレベルは、図2で示した高架橋および橋梁の fragility 関数について、各被害ランクを1ランク上げることが目標とした。ルート1を例にして、各補強ケースによる非超過確率50%の復旧期間のリスクカーブを図10に示す。これより、高架橋のみ補強では補強前と変化がないが、橋梁のみ補強では復旧期間が大幅に短くなることを確認できる。また、高架橋・橋梁同時補強によって復旧期間がさらに短くなるが、これは橋梁の補強によって橋梁がルートに与えていた影響が小さくなり、高架橋による影響が現れたためと考えられる。

5. まとめ

本研究では、将来の大規模地震に備えて緊急物資輸送ルートを確保するため、ルートを複数施設で構成されるポートフォリオとして確率論的にリスク評価を行なった事例を報告した。

今後は、施設別の fragility 関数や損傷箇所数・復旧期間の設定に関して、より合理的な手法の検討が必要と思われる。

参考文献

- 1) 首都直下地震道路啓開計画検討協議会：首都直下地震道路啓開計画(改訂版)，平成28年6月
- 2) 国土交通省：南海トラフ巨大地震・首都直下地震対策本部(第6回)資料2-7「平成29年度の重点対策【代表施策】」，平成28年8月24日
- 3) 国土技術政策総合研究所：道路施設に対する地震の防災投資効果に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，第160号，2004年3月
- 4) 大峯秀人ら：リスクファイナンスのための線状施設の地震リスク評価，土木学会論文集F6，Vol. 67，No. 1，pp.14-26，2011.
- 5) 翠川三郎ら：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，地域安全学会論文集，Vol. 1，pp.51-56，1999.
- 6) 損害保険料率算出機構：国・自治体の地震被害想定における被害予測手法の調査(平成25年度調査)報告書，平成26年5月
- 7) 笛木孝哲ら：高架道路橋の地震時機能損失評価，構造工学論文集，Vol. 55A，pp.449-459，2009.
- 8) 静間俊郎ら：ラダー系システムを用いた高速道路の地震時車両通行機能性評価，土木学会論文集A1，Vol. 67，No. 1，pp.86-94，2011.
- 9) Dependence of Large Earthquake Occurrence for Probabilistic Seismic Hazard Analysis in Japan, Risk Analysis, pp.233-242, WIT Press, 1998.
- 10) Kanno, T. et al. : A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 3, pp.879-897, 2006.

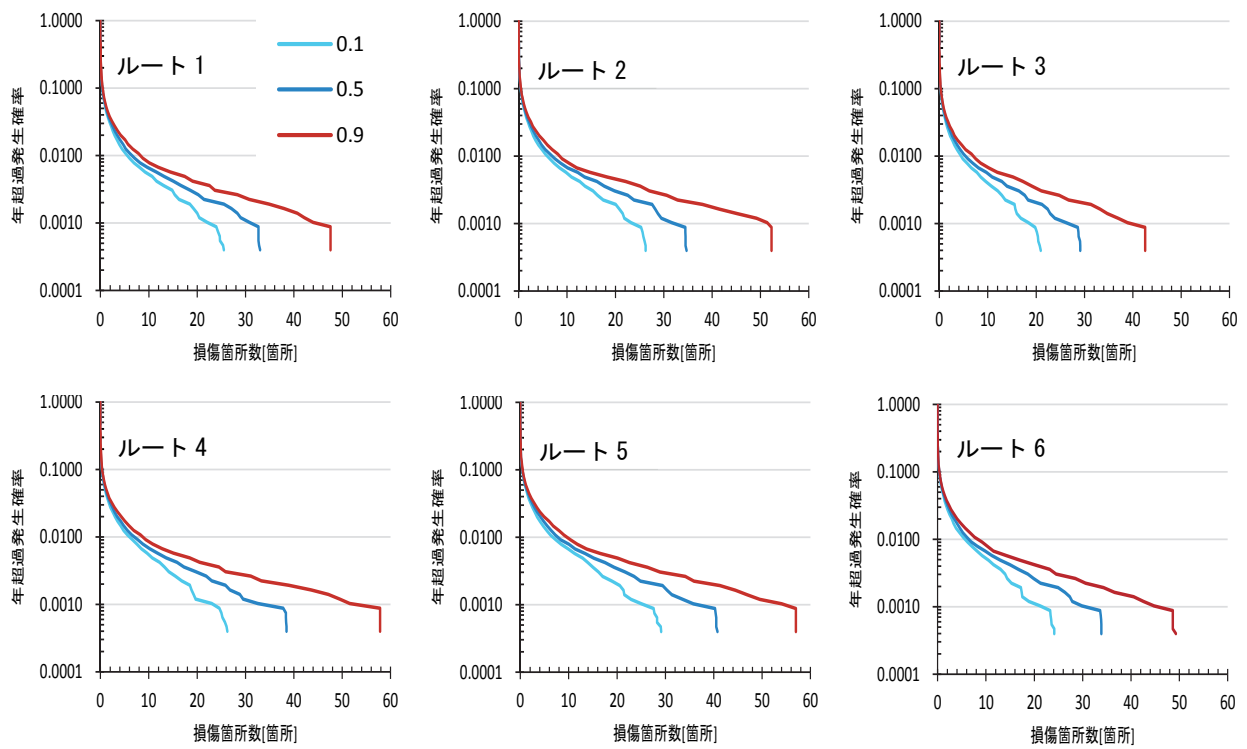


図6 各ルートの損傷箇所数のリスクカーブ (非超過確率 10%、50%、90%)

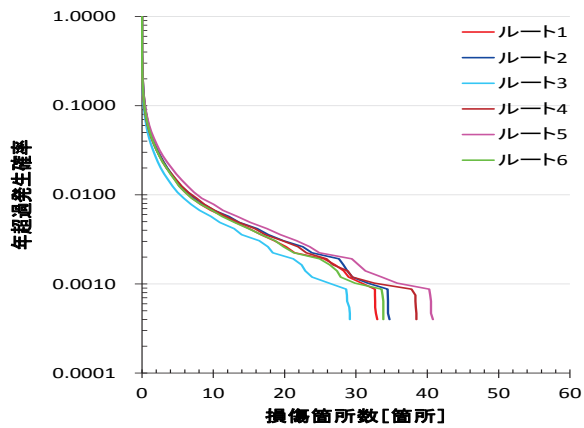


図7 ルートの損傷箇所数のリスクカーブ (非超過確率 50%)

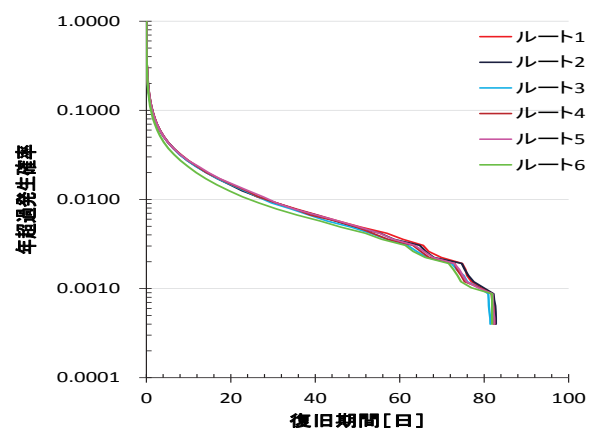


図8 ルートの復旧期間のリスクカーブ (非超過確率 50%)

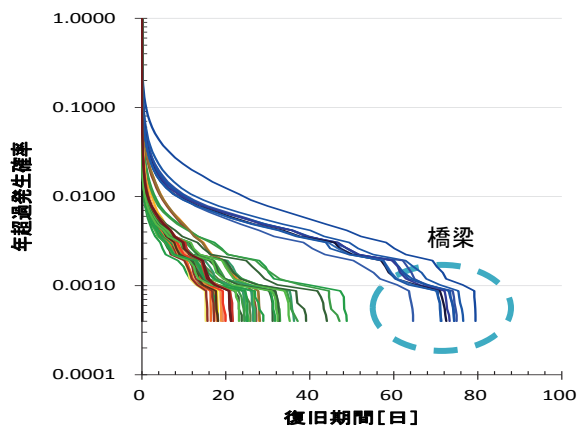


図9 施設別の復旧期間のリスクカーブ (非超過確率 50%)

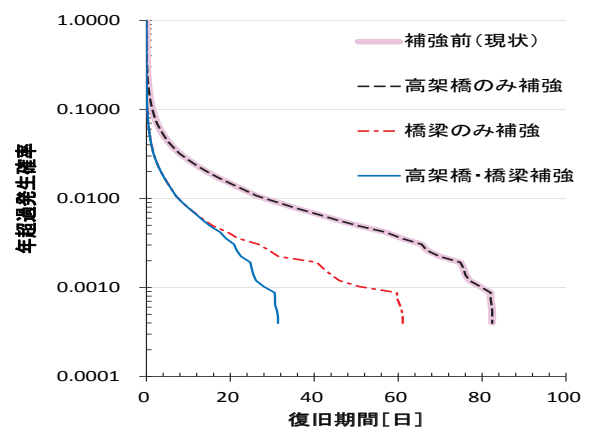


図10 補強を考慮した復旧期間のリスクカーブ (非超過確率 50%)