

# 環境条件を考慮した 橋梁の補修優先度決定法の提案 ～横浜市を対象にして～

南 貴大<sup>1</sup>・藤生 慎<sup>2</sup>・中山 晶一郎<sup>3</sup>・高山 純一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 金沢大学 環境デザイン学類 (〒920-1192石川県金沢市角間町)  
E-mail:takahoro1993@gmail.com

<sup>2</sup>正会員 金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail: fujju@se.kanazawa-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail: nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

<sup>4</sup>フェロー 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail: takayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

近年、東北地方太平洋沖地震や平成28年熊本地震などの大規模地震が発生している。地震動によって多くの橋梁が被災し、人命救助や物資輸送の妨げとなっている。本研究の対象地域とした横浜市では、橋梁の耐震補強が進んでおり、重要な橋梁については99%対策済みとなっている。しかし定期点検によると各橋梁の損傷程度にはばらつきがあり、健全な橋梁と比較して既損傷が生じている橋梁については地震によって被災するリスクが高い可能性がある。そこで本研究では、定期点検データを用いて地震によって損傷の受けやすい部材である支承部の既損傷の劣化予測を統計的に行った。また今後想定しうる地震動と地震時に損傷を受けやすい既損傷の程度により被災リスクの評価を行った。鋼支承はゴム支承に比べ劣化しやすく、被災リスクが高くなりやすいため、今後発生する地震を悪い状態で迎える可能性が高いことが分かった。

**Key Words :** *bridge maintenance, inspection data, earthquake, large-scale earthquake disaster, seismic risk evaluation*

## 1. はじめに

日本全国の道路橋（橋長 2.0m 以上）は現在約70万橋あり、そのうち一般的に橋梁の寿命とされている50年を経過している橋梁（高齢橋）は平成25年度で全体の約18%を占め、10年後には約43%を占めることが予想されている<sup>1)</sup>。公共事業費が年々減少する中、数年後には、高度経済成長期に集中的に建設された橋梁が供用年数50年を超え、橋梁の高齢化を迎えることとなり、人的にも費用的にも十分な対応が困難となる可能性が高い、このような状況の中、効率的な維持管理が重要視されており国や地方自治体では橋梁の定期点検を行うとともにアセットマネジメントの枠組みづくりが活発化している。

図-1、図-2からわかるように横浜市が管理する橋梁の多くが高度経済成長期に架設され、橋梁の高齢化が進んでいる。供用年数50年を超える高齢橋は現在（2016年）では全体の約19%であるが、20年後には全体の約68%占

めることになる。そこで県は事後保全的な修繕から、計画的かつ予防保全的維持管理に転換し、橋梁長寿命化によるライフサイクルコストの縮減及び維持・更新費の平準化を図り、道路網交通網の安全・安心の確保に努めている。そのため橋梁の定期点検を各橋梁5年に1度の頻度で行っており、橋梁を部材ごとに損傷度を評価し記録を行っている<sup>2)</sup>。

東北地方太平洋沖地震や平成28年熊本地震などの大規模地震が発生している。地震動によって多くの橋梁が被災し、人命救助や物資輸送の妨げとなっている。東京都及びその周辺地域は、南方からフィリピン海プレートが北米プレートの下に沈み込み、これらのプレートの下に東方から太平洋プレートが沈み込む特徴的で複雑なプレート構造を成す領域に位置しており、過去M7クラスの地震や相模トラフ沿いのM8クラスの大規模な地震が発生している<sup>3)</sup>。本研究の対象地域とした横浜市では、橋梁の耐震補強が進んでおり、重要な橋梁については99%

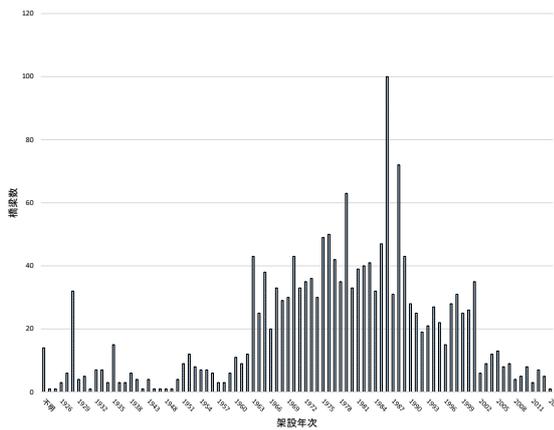


図-1 横浜市が管理する架設年次別橋梁数

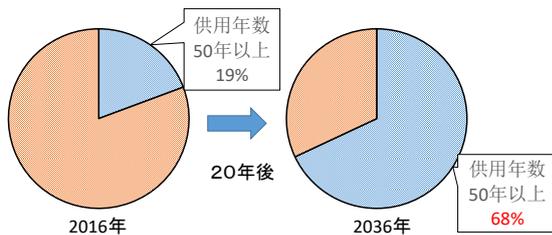


図-2 横浜市が管理する高齢橋の割合

対策済みとなっている<sup>2)</sup>。しかし定期点検によると各橋梁の損傷程度には、ばらつきがあり、直近の橋梁定期点検で伸縮装置・主桁・支承の遊間異常、主桁支点付近の減肉や亀裂、支承の機能低下など地震の影響を受けやすい損傷<sup>4)</sup>が確認されている場合、地震によって損傷が拡大する恐れがある。

そこで本研究では橋梁定期点検データを用いて地震時に損傷を受けやすい部材である支承部の経年劣化を数量化理論Ⅰ類を用いて統計的に予測を行い、今後想定しうる地震動と予測した既損傷を用いて将来の地震時の被災リスクの把握を行った。

## 2. 既往研究

これまでに橋梁定期点検データを用いた研究は数多く行われている。

大島ら<sup>5)</sup>はこれまで実施してきた物理的健全度評価を踏まえたうえで耐震性に関連するアイテムを選定し、エキスパートにアンケートを行い、その結果を数量化理論により解析し、得られたそれぞれのアイテムに対する重み係数を考慮した耐震性健全度評価を提案している。

貝戸ら<sup>6) 7)</sup>はNY市がここ9年間に実施した829橋梁に対する目視点検結果を用いて劣化速度に着目したマルコフ過程に基づく劣化予測を提案している。また長大橋の

目視点検上の管理限界状態として想定する頂上事象を定め、頂上事象の原因となる下位事象をフォルト・ツリーで構成し、下位事象の発生確率をマルコフ劣化ハザードモデルで与えることで頂上事象の発生確率の経時変化を算出した。

近田ら<sup>8)</sup>はI県が昭和57年から63年度の間の橋梁定期点検データの数量化理論Ⅱ類による分析結果を用いた橋梁の健全度に基づき補修後に管理対象橋梁群のトータル健全度を最大とする補修橋梁・部位の組み合わせ最適化問題に、遺伝的アルゴリズムを採用したナップサック問題を適用することで解決している。

また道路構造物の耐震性評価指標に関する研究も行われている。

久世ら<sup>9)</sup>は、高速道路の耐震化優先度指標に、複数の想定地震の予測震度と発生確率を考慮した震度の期待値と、迂回の所要時間を基準に算出した路線重要度、構造物の脆弱度と復旧度を基準に算出した構造物特性によるIC間の交通機能支障度を提案している。

秦ら<sup>10)</sup>は、高速道路のIC間における高速道路盛土の耐震性評価指標を各想定断層の50年発生確率と各想定地震の各断面における残留変位量を用いて算出している。

しかし、これらの研究では構造物の現状の損傷状況が考慮されていない。

これまで著者らは<sup>11)</sup>、定期点検で得られる最新の健全度を用いて地震時の被災リスクを考慮した補修優先度決定法を主成分分析によって提案している。しかし各部材の健全性については最新の点検結果で評価しており、各部材の健全性の遷移については考慮されていない。本研究では、2期分の点検結果を用いることで橋梁の健全性の遷移を考慮し、地震時における橋梁の被災リスクの把握を行う。本研究で把握する被災リスクは、今後いつ発生するかわからない不確実な地震に対応するための補修優先度を決定する上で意義深いものであると考える。

## 3. 使用データ

橋梁定期点検は、道路橋の各部材の状態を把握、診断し、当該道路橋に維持や補修・補強等の必要な措置を特定するために必要な情報を得るためのものであり、安全で円滑な交通の確保、沿道や第三者への被害の防止を図るなどの橋梁に係る維持管理を適切に行うために必要な情報を得ることを目的に実施されている。橋梁定期点検では、損傷状況の把握及び対策区分の判定を行い、これらに基づき部材単位での健全性の診断及び道路橋毎の健全性の診断を行い、これらの結果の記録を行う。

横浜市では平成12年度に「公共施設の長寿化」の基本方針を定め、横浜市独自の定期点検要領を策定した。

平成14年度から、この定期点検要領を基に定期点検を開始し、平成19年度までにすべての橋梁の点検を終えている。現在では橋の重要度YBPI（交通容量、緊急輸送路指定の有無、第三者被害）と橋梁の損傷度YBHI（定期点検による各部材の損傷度から求める橋全体の損傷度）のマトリックスによって、補修の優先度を決定し、橋の健全性を維持している<sup>12)</sup>。

5年に1度の頻度で定期点検を実施するために、毎年5分の1を目安に点検を行っている。点検は径間ごとに、橋面工（舗装、伸縮装置、高欄・防護柵・地覆、付属物）、上部工（コンクリート床版、鋼床版、コンクリート桁、鋼桁）、下部工、基礎、支承、落橋防止、その他、などの点検項目があり、それぞれの損傷状況に応じて損傷度が健全なものから順に、無、「a」、「b」、「c」、「d」、「e」で評価されている。また判定できないものは「判定不可」、部材がないものに関しては「部材なし」と判定されている。また損傷の規模については、「大」、「中」、「小」、「無」と評価されている。径間の中で最も悪い損傷度を橋梁単位の損傷度とし、それによってYBHIを算出している。本研究では地震によって影響を受けやすい支承部の橋梁単位の損傷に着目した。

#### 4. 横浜市における橋梁の基礎分析

横浜市が管理する橋梁1725橋（平成27年4月1日現在）のうち鋼支承の点検結果を有している橋梁は884橋、ゴム支承の点検結果を有しているものは954橋であった。横浜市橋梁定期点検要領に準じて、鋼支承は腐食、亀裂・破断、変形・欠損、沈下・傾斜についての損傷を点検対象としており、ゴム支承は亀裂・破断、変色・劣化、

表-1 支承部における損傷程度判定基準

損傷度	損傷状況
4	損傷なし
3	損傷あり
2	支承機能に障害あり
1	通行車両に支障

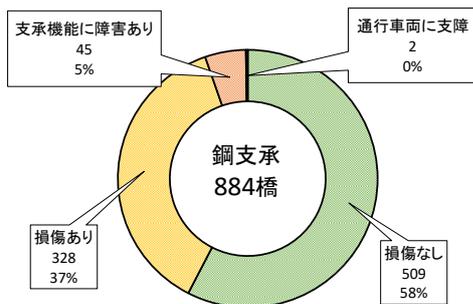


図-3 鋼支承の損傷程度の割合

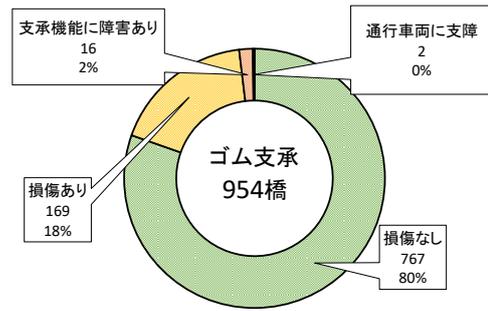


図-4 ゴム支承の損傷程度の割合

変形・欠損についての損傷を点検対象としている。鋼支承もゴム支承も4段階で評価されており最も健全なものから、損傷なし、損傷あり、支承機能に障害あり、通行車両に支障と評価されている。本研究では表-1に示すように損傷状況に応じて損傷度を健全なものから4, 3, 2, 1と定義した。

最新の点検結果における鋼支承の損傷状況について図-3に、ゴム支承について図-4に示す。損傷あり以上の評価がされている割合が、鋼支承においては約42%であるのに対し、ゴム支承では約20%であることが分かる。鋼支承は現段階においてゴム支承よりも損傷している割合が大きく、損傷を受けやすい部材であることが分かる。

#### 5. 支承部の劣化予測

補修を行わなかった場合、支承部は経年劣化により健全性が落ちることが予想される。また地震はいつ発生するかわからないため、地震時に影響を受けやすい部材である支承部の将来の損傷状況を把握することは事前の防災・減災対策を講じるうえで重要である。

##### (1) 支承部の損傷度を用いた劣化指標

支承部の劣化指標として単に損傷度を用いるのでは、ある1時点の損傷状況のみを考慮するため、実質的な経年に対する劣化を把握できないこと、補修や補強を行って損傷状況が回復しているサンプルを把握できないことなどの問題が生じる。横浜市では平成14年から橋梁の定期点検を行っており、点検結果の蓄積がなされている。本研究では2回分の点検結果が蓄積された橋梁を対象に劣化指標を算出する。劣化指標は式(1)に示すように1巡目の点検結果から得られる支承部の損傷度と2巡目の点検結果から得られる支承部の損傷度の差を損傷度の落ち幅として定義した。損傷度の落ち幅が0より大きい場合損傷状況が悪化、損傷度の落ち幅が0のとき損傷状況の変化なし、損傷度の落ち幅が0より小さいとき補修・補強の可能性があると捉えることが可能となる。そのた

め補修・補強履歴がないデータを扱うことができる。今回用いた2巡分の点検結果の点検スパンは平均的に8年程度であったため8年後にどの程度損傷度が変化しているのかについて表した指標となっている。

$$H = d1 - d2 \quad (1)$$

H：損傷度の落ち幅  
 d1：1回目点検結果の損傷度  
 d2：2回目点検結果の損傷度

(2) 分析手法

支承部の劣化する速さは橋梁が置かれている環境や橋梁の諸元によって左右されることが考えられる。本研究では数量化理論 I 類を用いて、支承部の劣化について定期点検に記載されており、データ欠損の少ない変数で説明することを試みた。

数量化理論 I 類とは目的変数と説明変数との関係を調べ、関係式を作成し、説明変数の各水準の目的変数に対する影響度、説明変数の重要度、目的変数の予測を明らかにする手法である。重回帰分析との相違点は説明変数のデータ形式が重回帰分析では数量データであるのに対し、数量化理論 I 類はカテゴリーデータであることである。本研究では説明変数として各諸元の水準を数量化することによって数量化理論 I 類を適応している。

目的変数として補修・補強のサンプルを除くため、損傷度の落ち幅が0以上のサンプルを用いた。

説明変数としては横浜市における橋梁の定期点検データから入手可能であり欠損の少ない諸元である供用年数、橋種、橋長、有効幅員、位置情報から得られる海岸線からの距離を用いた。各諸元の水準については表-2に示す。各水準に当てはまるサンプル数が10以上になるように水準を決定した。

(3) 分析結果

表-2 各説明変数における水準分け

説明変数	水準	サンプル数 (鋼支承)	サンプル数 (ゴム支承)
供用年数	0~10年	29	66
	10~20年	82	113
	20~30年	111	114
	30~40年	56	54
	40年以上	42	33
橋種	コンクリート	74	283
	鋼	236	87
	その他	10	10
橋長	0~15m	66	177
	15~50m	196	162
	50~100m	39	27
	100m以上	19	14
有効幅員	4.5m以下	105	71
	4.5~18m	183	283
	18m以上	32	26
海岸線からの距離	1km以内	25	24
	1km~3km	43	42
	3km以上	252	314

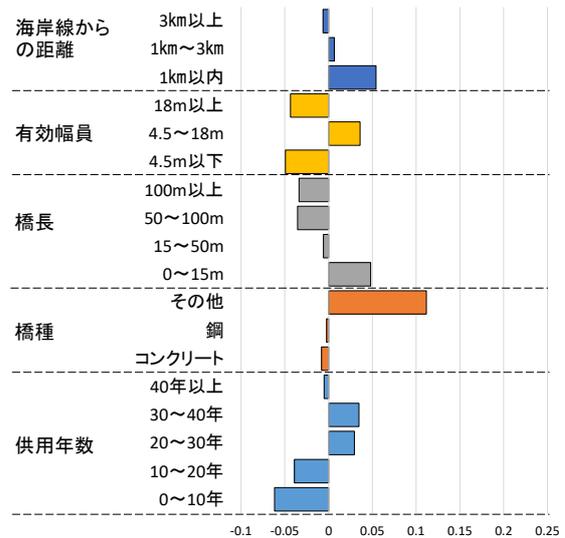


図-5 鋼支承の損傷落ち幅におけるカテゴリースコア

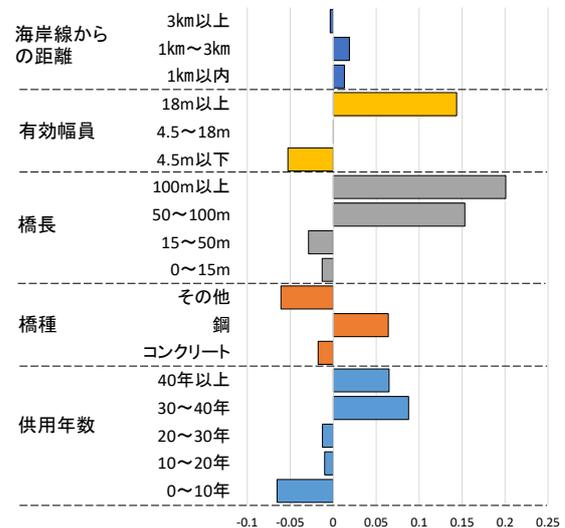


図-6 ゴム支承の損傷落ち幅におけるカテゴリースコア

目的変数を支承部の損傷度の落ち幅、説明変数を橋梁の諸元として数量化理論 I 類を用いることで、損傷度の落ち幅に影響を与える要因について明らかにする。数量化理論 I 類によって得られる定数項は損傷度の落ち幅の平均値を表しており、カテゴリースコアは各説明変数が損傷度の落ち幅に与える影響の程度を表している。

a) 鋼支承における損傷度の落ち幅

2巡分の点検結果が蓄積されており、鋼支承の損傷度の落ち幅が0以上のサンプルは320であった。数量化理論 I 類の結果、定数項は0.2844であり、重相関係数は0.1267であった。カテゴリースコアについては図-5に示す。海岸線からの距離が近いほど損傷度の落ち幅が大きくなりやすいことが分かる。橋長については長いほど損傷度の落ち幅が小さくなる傾向がみられる。供用年数が40年未満であると供用年数が長いほど損傷度の落ち幅が大きくなる傾向がみられるが、供用年数40年以上である

と過去に補強などの対策を行っているためか損傷度の落ち幅が小さくなる事が分かる。

**b) ゴム支承における損傷度の落ち幅**

2巡分の点検結果が蓄積されており、ゴム支承の損傷度の落ち幅が0以上のサンプルは380であった。数量化理論 I 類の結果、定数項は0.0684であり、重相関係数は0.3523であった。カテゴリースコアについては図-6に示す。有効幅員つまり交通容量が大きいほどゴム支承の損傷度の落ち幅が大きくなる傾向がみられる。橋長については長いほど損傷度の落ち幅が大きくなる傾向がみられる。供用年数が長いほどおよそ損傷度の落ち幅が大きくなる傾向がみられる。

**6. 地震時における被災リスク把握**

災害による被害はハザードと脆弱性との関係で決定される。本研究でのハザードとは地震による外力のことを指し、脆弱性とは橋梁の災害に対する弱さを意味しており、前者は人間の力でコントロールできないが、後者は耐震化や維持管理の手法によって減少させることが可能である。

**(1) ハザード**

本研究では図-7に示した東日本大震災において被害を受けた橋梁のマクロ分析による計測震度に対する被災率曲線<sup>13)</sup>を用いて算出した被災率をハザードの指標とした。

想定しうる計測震度としては図-8に示すようなJ-SHIS地震ハザードステーション<sup>14)</sup>の確率論的地震動予測地図を用いた。確率論的地震動予測地図とは、日本及びその周辺で起こりうる全ての地震に対して、その発生場所、発生可能性、規模を確率論的手法によって評価し、さらにそれら地震が発生したときに生じる地震動の強さをパラッキも含めて評価することにより、一定の期間内に、ある地点が、ある大きさ以上の揺れに見舞われる確率を計算することにより作成されている。地点ごとに地震ハザード評価を実施し、地震動の強さ・期間・確率のうち

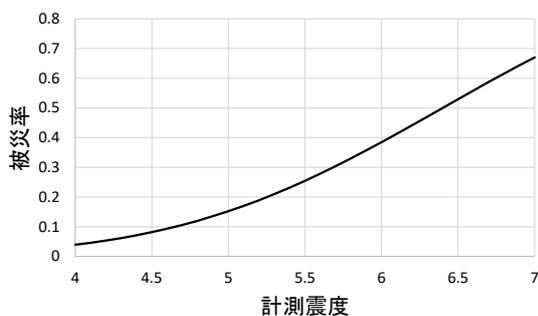


図-7 計測震度に関するフラジリティ曲線<sup>12)</sup>

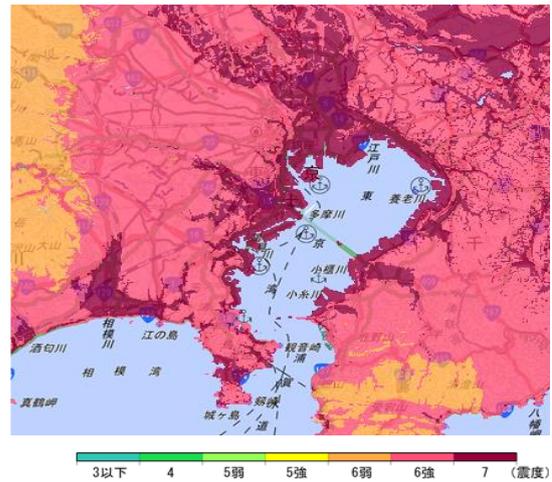


図-8 50年2%で発生しうる計測震度分布

2つを固定して残る1つの値を求めた上で、それらの値の分布を250mメッシュで示したものである。想定しうる震度分布にも様々な期間の確率のケースがあるが、本研究では最大ケースを想定して50年2%確率の計測震度を用いた。

**(2) 脆弱性**

本研究では、地震に対する脆弱性を地震時に損傷を受けやすい部材である支承部の損傷度とした。今後老朽化が進む中で脆弱性が増すことが予想される。今後変化する被災リスクの変化を把握するために、脆弱性として現在の支承部の損傷度と5章で算出したカテゴリースコアと定数項を用いて予測した40年後の支承部の損傷度を考慮した。

**a) 鋼支承の被災リスク**

横浜市における鋼支承の点検結果を有している884橋について、劣化予測によって得られた鋼支承の損傷度を用いて、今後の被災リスクの変化の把握を行った結果を図-9に示す。今後50年に2%の確率で予想される計測震度が高い箇所が存在する鋼支承を有する橋梁が多い。被災率が50%以上の揺れに見舞われる箇所における損傷度2以下の鋼支承の割合は現在では約6%、40年後には約42%を占めることが予想される。

**b) ゴム支承の被災リスク**

横浜市におけるゴム支承の点検結果を有している954橋について、劣化予測によって得られたゴム支承の損傷度を用いて、今後の被災リスクの変化の把握を行った結果を図-10に示す。今後50年に2%の確率で予想される計測震度が高い箇所が存在するゴム支承を有する橋梁が多い。被災率が50%以上の揺れに見舞われる箇所における損傷度2以下のゴム支承の割合は現在では約2%、40年後には約8%を占めることが予想される。

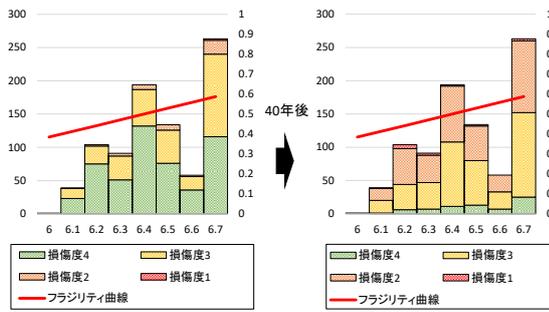


図-9 鋼支承の被災リスクの変化

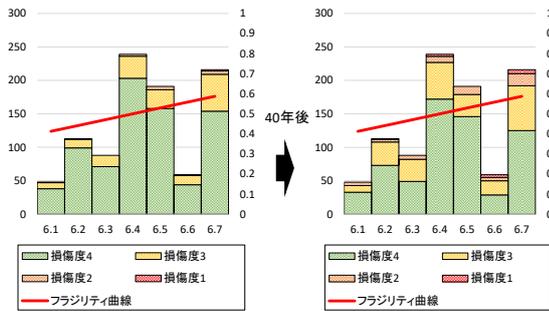


図-10 ゴム支承の被災リスクの変化

## 7. まとめと今後の課題

本研究では横浜市の橋梁定期点検データを用いて、地震時に被災しやすい部材である支承部について数量化理論 I 類を用いて劣化予測を行った。

地震時の橋梁の被災リスクについてハザードと脆弱性で評価を行った。ハザードについて50年に2%で見舞われる計測震度と東日本大震災時の橋梁被害のマクロ分析によって得られている fragility 曲線を用いて評価を行った。また脆弱性については、支承部の損傷度を用いて評価を行った。その結果、鋼支承はゴム支承に比べて、損傷度が低下しやすく、補修を行わない場合、今後被災リスクが急速に増加することが予測される。

既損傷を用いた地震時の被災リスクを評価したこと、損傷度の劣化予測を行い、被災リスクの経年的な変化についても明らかにしたことは、地震時における被災リスクを考慮した維持管理手法を決定する際の手助けになると考える。

本研究では、定期点検から得られる支承部の損傷から被災リスクを評価することを目的としているが、今後は本研究で評価した被災リスクの指標を用いた維持管理手法の構築が必要である。

数量化 I 類の結果である重相関係数が低く、目的変数である損傷度の落ち幅が十分に説明できていないため損傷度の定義の見直しや説明変数のカテゴリーの検討などによってパラメータの一般性の向上を行う必要がある。

本研究では支承部を対象にして被災リスクを把握しているが地震時に影響を受けやすい部材である橋脚・橋台、

桁端部などの被災リスクの評価については今後の課題である。

**謝辞:** 本研究を遂行するにあたり貴重な橋梁に関するデータをご提供していただきました横浜市道路局建設部橋梁課の皆様ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 国土交通白書 H26 第 2 部第 2 節  
<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h26/hakusho/h27/pdf/np202000.pdf>, 2015 年 7 月 17 日閲覧
- 横浜市道路局道路課 橋梁の長寿化計画  
<http://www.city.yokohama.lg.jp/doro/kyouryou/asset-management/>, 2016 年 7 月 29 日閲覧
- 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ、首都直下地震の被害想定と対策について  
[http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku\\_wg/pdf/syuto\\_wg\\_report.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/pdf/syuto_wg_report.pdf), 2016 年 6 月 17 日閲覧
- 橋梁点検ハンドブック-国土交通省北陸整備局 pp40-43  
<http://www.hrr.mlit.go.jp/hokugi/file/mijika/kyoryo-handbook-A5.pdf>, 2015 年 7 月 17 日閲覧
- 大島 俊之, 三上 修一, 山崎 智之, 丹波 郁恵: 橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析, 土木学会論文集, No.675, pp.201-217, 2001.
- 貝戸清之, 阿部允, 本間仁, 藤野陽三: 実測データに基づく構造物の劣化予測, 土木学会論文集, No.744, pp29-38, 2003
- 貝戸清之, 金治英貞, 小林寛, 間嶋信博, 大石秀雄, 松岡弘大: 目視点検データを用いたフォルト・ツリー分析に基づく長大橋の最適点検政策の決定手法, 土木学会論文集 F4, Vol.67, No.2, pp74-91
- 近田康夫, 橋謙二, 城戸隆良, 小堀為雄: GA による既存橋梁の補修計画支援の試み, 土木学会論文集, No.513, pp151-159, 1995
- 久世益充, 都竹延晃, 岩崎真二郎, 杉戸真太, 高速道路路線における耐震化優先度評価に関する検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70 No. 4 p. I\_219-I\_226
- 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田孝, 今村孝志, 盛土の耐震診断に基づく高速道路の通行機能の耐震性評価, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.50-58
- 南貴大, 藤生慎, 中山晶一郎, 高山純一: 地震リスクを考慮した橋梁の補修優先度決定法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72 No.4 p. I\_700-I\_707
- 樽川正弘 横浜市における橋梁長寿化に向けた取り組み 社会資本の戦略的な維持管理—メンテナンス時代の到来を見据えて—  
[http://www.zenken.com/kik-kansi/vol\\_60/02/zk\\_vol60\\_02\\_11\\_13.pdf](http://www.zenken.com/kik-kansi/vol_60/02/zk_vol60_02_11_13.pdf), 2016 年 6 月 22 日アクセス
- 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会 最終報告書, pp1-50
- J-SHIS 地震ハザードステーション  
<http://www.jshis.bosai.go.jp/>, 2016 年 6 月 25 日閲覧