

都市高速道路における橋梁上部工の 損傷発生確率の推定

副島 直史¹・稲村 肇²・森地 茂³・日比野 直彦⁴

¹ 学生会員 政策研究大学院大学 大学院政策研究科 (〒106-8677 東京都港区六本木 7-22-1)

E-mail:mjd12203@grips.ac.jp

² フェロー会員 東北工業大学教授 工学研究科 (〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

E-mail:hajime.inamura@gmail.com

³ 名誉会員 政策研究大学院大学特別教授 大学院政策研究科 (〒106-8677 東京都港区六本木 7-22-1)

E-mail:smorichi.pl@grips.ac.jp

⁴ 正会員 政策研究大学院大学准教授 大学院政策研究科 (〒106-8677 東京都港区六本木 7-22-1)

E-mail:hibino@grips.ac.jp

首都高速道路は、1960,70年代の高度成長期に建設されたものも多い。そのため建設から30年以上経過した路線は全体の4割以上を占め、構造物には損傷が多数発見されている。本研究は、高速道路の橋梁の上部工に焦点をあて、首都高速道路の点検データベースを用いて分析を行い、損傷の実態を把握することを目的としている。本研究により以下のことが明らかになった。①補修に必要な損傷は鋼構造物に多くそれはクラックと腐食である。②コンクリートはひび割れと剥離で発生分布が異なる。③上記分類のもとでは径間当りの補修すべき損傷発生数は、一定の平均値を持つポアソン分布に従うものもある。④重回帰分析によれば、床板の厚さ、ピーク時速度などが損傷の発生に影響を与える。⑤走行速度などのその他要因は損傷の発生と有意な相関がない。

Key Words : viaduct structure, Poisson distribution, regression analysis, inspection and maintenance

1. 序論

(1) 研究の背景

道路、空港、港湾、下水道といった社会資本は、我々の日常生活や生産活動の基盤として、大きな役割を果たしている。しかしながら、高度経済成長期に集中的に整備された社会資本ストックは、今後に集中的に更新の時期を迎えることになり、適切な維持管理を欠いた場合には、老朽化した社会資本が本来の機能を保てなくなるおそれや、その崩壊等による事故の発生などが懸念される。

また近年の厳しい財政状況から、公共事業予算の削減が継続して行われてきた。今後、本格的な少子・高齢化、人口減少時代を迎えて、長期的な投資余力の減少も見込まれる。そのため、近い将来社会資本ストックの維持管理・更新に要する費用の増大が、社会資本の新設投資を大きく制約し、このまま推移すれば、新設投資が不可能になるとの推計もなされている¹⁾。

本研究においては、限られた予算の中からインフラの効率的な維持管理のために、道路構造物の中で橋梁、特に首都高速道路を題材として、構造物の損傷がどのように発生しているのか、また損傷の要因が何かを主題とし

て取りあげ、今後の点検・補修に関する判断支援の一助とするものである。

(2) 既往研究のレビューと本研究の位置づけ

社会インフラ施設の効率的な維持管理のために、近年土木構造物のアセットマネジメントについての取組みが行われてきており、小林等²⁾や慈道等³⁾によるもの等が蓄積されてきている。アセットマネジメントにおいては、将来にわたる構造物の劣化を予測することが、効率的で経済的な維持管理のための予算計画を策定するのに重要とされている。その劣化予測に関しては、貝戸等⁴⁾、津田等⁵⁾、青木等⁶⁾の様々な取組みが行われている。

道路構造物に着目してみると、各地方公共団体での取組が多面で紹介されている⁷⁾が、これらは実点検データをもとに、個別に独自のシステムを構築し、各管理者が設定した補修時期や効率的な投資の効率的なタイミングを策定するツールであり、損傷の発生程度や劣化の要因を詳細に分析しているケースは少ない。

今回着目する首都高速道路においても、効率的な維持管理を実施するために、データベースを活用した維持管理を実施している。そのデータベースには、点検を実施

し損傷を発見した際はその種類や程度等を記載し、補修すべき損傷には補修後その履歴を記載する。さらにその履歴から、今後の点検や補修計画を策定するという取り組みを行うことにより、効率的な維持管理サイクルの実現に取り組んでいる⁸⁾。一方、そのデータベースは台帳としての役割が大きく、データを活用した統計的な損傷の分析は発展途上である。

こうした背景から、本研究においては同データベースを用い、統計的な手法に基づき分析を実施し、損傷の発生程度やその要因を明らかにすることを目的とする。なお、その対象は、特に都市高速に多く採用されているような橋梁とし、その中でも損傷が多く発生している上部工に焦点をあてる。

2.首都高速道路の橋梁における損傷状況と傾向

(1) 構造物の概要

首都高速道路は、一都三県にまたがる延長約300kmの道路網である。1日の交通量は約100万台/日であり、一般道路に比べ大型車の通行量が多い。図-1に首都高速道路の経過年数延長を示す。H24.4現在30年以上経過した路線は全体の約4割以上を占め、構造物の高齢化が進んでいる。

また、路線の大部分は、狹隘で錯綜した都市空間において用地買収が困難な理由等から、既存の道路や河川等の公共用地を利用して建設されている。そのため、供用延長の95%は高架橋やトンネル等の構造物となっており、他の道路に比べ構造物比率が高い。図-2に他の道路との構造物比較を示す。高架橋は土工部と比べ複雑な構造をもつ等、点検及び補修にかかわる維持管理コストは比較的高い⁹⁾。

(2) 維持管理の状況と損傷状況

首都高速道路においては、「構造物等点検要領⁹⁾」（以下点検要領とする）を策定し、損傷等のランク付けや判定基準を明確に規定し、構造物の点検を実施している。点検要領においては、点検をその用途から表-1のように分類している。

首都高速道路においては、これら点検において様々な損傷が発見されており、その中でも、橋梁の上部工には多数の損傷が発見されている。補修を必要とする損傷は年々増加傾向にあり、前述の通り、効率的な取組みを実施し、計画的に補修を進めているが、点検で発見されるすべての損傷を補修するには至っていない。

なお、材料的な要素から橋梁上部工はコンクリート構造物と鋼構造物に大別できるが、それぞれに多様な損傷が発見されている（図-3）。コンクリート構造物については、ひび割れや剥離（鉄筋露出）のような損傷が発見

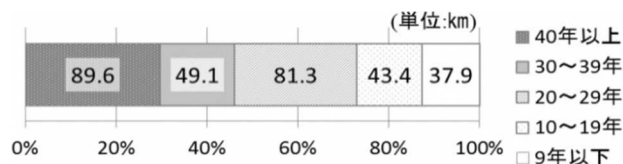


図-1 首都高速道路の経過年数別延長⁸⁾

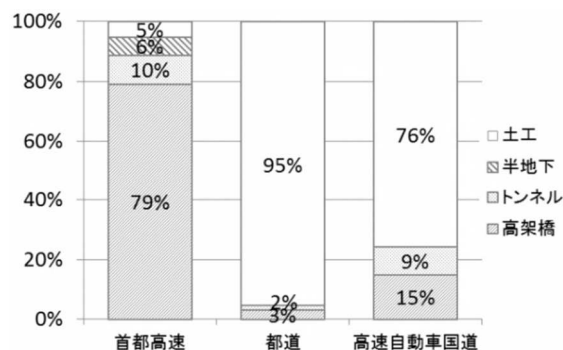


図-2 構造物別延長比率⁹⁾

表-1 首都高速道路における点検種別

点検種別	概要
日常点検	安全かつ円滑な交通の確保や第三者被害の防止を目的とし日常的に実施する点検
定期点検	構造物等に発生する全ての損傷等を見出すことを目的とし、接近点検を原則とし、補修や構造物の状態を把握する基礎資料となる最も重要な点検(周期は5年)
臨時点検	大地震、暴風雨時および事故発生時等の臨時に実施する点検



図-3 橋梁上部工の損傷事例⁹⁾

されており、鋼構造物においては腐食（錆）やクラック（き裂）のような損傷が主に発見されている。

図-4は高速1号上野線の損傷発生件数を、径間単位で示したものである。この図から明らかに、損傷の発生状況には以下の特徴が観察される。AとBの区間は同じ径間数を範囲としているが、同じ径間数でもAの部分ようにある区間においては多くの損傷（5か所以上）が発生している。それに対してBの部分においては、損傷が発生していない径間も多い。

このような状況を統計的に考察すると、Aの部分はB

の部分と比較して構造や建設条件等何らかの明らかな条件の相違があるはずである。また、Aの部分の損傷数は多いがその中でもバラツキも多く、Bの部分も損傷は不規則なため、損傷の発生条件は複数の要因が重なって影響していると考えられる。こうした場合、桁が独立しており発生確率は相互に影響されないこと、統計分析が可能な量の点検データがあること等から、損傷発生の原因分析には重回帰分析等の統計分析が適当であると考えられる。

Bの部分では損傷の発生頻度が少なく、また不規則に分布しており、このような部分においては損傷の発生は構造等の明確な要因というより偶然性に左右され、損傷の原因を特定することは困難と思われる。このような事象は統計学の分野においては発生確率はポアソン分布に従うということが知られている。このことは、発生分布がポアソン分布に従えば、損傷の発生は未知の原因によるランダムな現象であるとも言える。そして損傷の発生量は一定の平均値をもつ確率分布として将来予測も可能である。

上記の理由により、本研究においては損傷発生件数に関する重回帰解析による分析と、損傷が稀な発生事象に着目したポアソン分布の適合性の分析に分けて研究することとする。また上記の考察は桁の損傷について言及したものであるが、コンクリート床版の損傷にも同様な考えを適用する。

(3) 使用データ

首都高速道路の維持管理は、データベースを活用して実施していることは前述の通りであるが、本研究にはこのデータベース「保全情報管理システム」¹⁰⁾を用いる。その中でも、定期点検のデータを用いる。日常点検は、主に目視により異物の落下等を未然に防ぐことが主な調査項目であり、臨時点検は有事の際における損傷の有無を点検するものであり、共に構造物の劣化を調査するものではないためである。なお、分析期間はこのデータベースが運用されたH13年からH23年末までとする。

3. 損傷発生分析

(1) 損傷発生分析の目的

土木構造物の中でも、特に複雑な構造を持つ橋梁における損傷の要因は、通過交通、経年劣化、施工不良等様々である。損傷1つ1つにその原因を明確に説明することは困難であるが、同じ環境条件や使用条件にある路線に分割して損傷を分析すると不確定要素が多い中にもある規則性を持つと仮定する。今回1つの損傷を1つの事象としてとらえ、確率分布によりその発生を定量的に評価し、どの程度損傷が発生しているかを把握する。

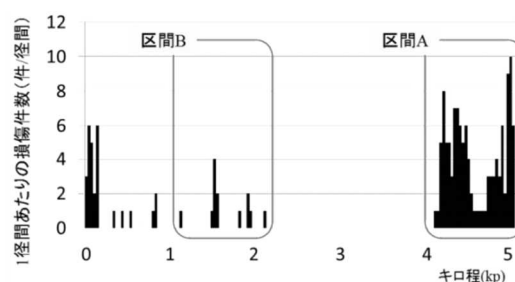


図-4 高速1号上野線における上部工の損傷分布

橋梁上部工は、その構造から大きく床板と桁に分類でき、今回の分析においても床板と桁に分割し分析を行う。床板および桁には様々な材料や形状があるが、首都高速道路の橋梁形式で最も径間数の多い鋼桁（鉄桁）とRC(Reinforced Concrete)床板を対象とし、路線ごとに損傷の発生がどのような特性を持つか把握することを目的とする。

(2) ポアソン分布の適用

土木分野においては、確率分布を適用した様々な研究が従来より行われてきたが、橋梁の損傷は稀少現象と位置づけ、ポアソン分布を適用する¹¹⁾。

分析にあたっては、1径間の損傷数を分析単位とする。これは、前述のデータベースにおいて位置情報として径間ごとの管理をしており、補修や点検の際も径間を主な作業単位として用いているためである。また、桁の本数や橋面積も径間ごとに異なることから、損傷の発生特性も径間ごとに異なることを考慮した結果でもある。その際損傷を、RC床板は「ひび割れ」と「剥離」、鋼桁は「クラック」と「腐食」に分類する。これは、ひび割れやクラックが交通量などの使用条件に起因する発生に対し、剥離や腐食は経年劣化に起因する発生であると考えたためである。さらにクラックについては、主桁や横桁等の主部材に発生するクラックと、部材の接合点となる添接板のような二次部材に発生するクラックを分割して分析を行う。これは、主部材に発生するクラックが落橋等の重大な損傷につながるという危険性をもつ一方、二次部材におけるクラックは比較的軽微なものが多く¹²⁾、補修する際も規模や方針も異なるということを考慮した。

対象とする路線については交通量と経過年数が異なる特性を持つ、高速3号渋谷線、高速1号上野線、中央環状線（東京東地区）、高速神奈川5号大黒線（以下それぞれ渋谷線、上野線、中央環状線、大黒線とする）を対象とし、この4路線における各部位の損傷発生程度（期待値）を比較・評価することで、損傷と交通量及び経過年数がどのように影響しているかを分析する。なお、4路線の交通量¹³⁾及び経過年数の関係については、表-2の通りである。

(3) 発生確率分析による結果と考察

各部位における損傷別の損傷分布を図-5～10に、それぞれの損傷発生期待値を表-3に示す。

RC床板のひび割れについての損傷発生分布は、図-5に示すようにポアソン分布のフィットが良い。また、発生期待値については、剥離と比較して値が小さく、ひび割れの発生は剥離の発生に比べ少ないことが分かる。また、差は小さいものの交通量の多い渋谷線と中央環状線の値が高い結果を得た。

RC床板の剥離について考察すると、発生期待値はひび割れに比べ路線の差が大きく、渋谷線と上野線の値が大きい結果となった。図-6に示すRC床板の剥離の損傷分布からもこの2路線における損傷分布は、生起確率が小さい現象を示すポアソン分布にフィットせず、むしろ指数分布に近く、損傷はランダムに発生するわけでないことを示している。そこで、図-7、8に示す通り渋谷線及び上野線において、床板の厚さ別に損傷分布を確認した。床板の厚さ別に分布を確認すると、 $t=16,17\text{cm}$ における損傷分布は一様分布の傾向に近く、損傷が多数発生していることが分かる。その一方 $t=18\text{cm}$ 以上は、ポアソン分布のフィットこそ良好ではないが、比較的損傷の発生は少ない。これは、渋谷線、上野線がS39年の設計基準で設計されており、この2路線において床板の最小厚さは16cmであり、中央環状線および大黒線の最小厚さを2割程度も下回ることにより理由があると考えた。床板の薄肉は鉄筋の密実化による骨材の充填不足やかぶり不足につながり、これらが剥離に影響したものと考えられる。また、渋谷線や上野線が建設されたS40年代は、わが国の高度経済成長時代であり、この時期のコンクリートは生産性の向上やコスト低減のための施工不良や、建設需要の拡大で良質な骨材が不足したことなどの理由も相まって、剥離に影響していると考えられる。

鋼桁のクラックについて考察すると、図-9に示す通り渋谷線の二次部材以外はポアソン分布のフィットが良い。つまり、渋谷線における二次部材のクラックはランダム発生でないということを示している。損傷の発生期待値は、渋谷線の値が他の路線に比べ高く、クラックの発生や進展が通過交通による荷重と受ける回数が影響することを考慮すると、供用時からの累積交通量が大きく起因した結果であると考えられる。二次部材に着目してみると、中央環状線においては経過年数30年に満たないにも関わらず、上野線と同程度の損傷発生確率となっている。つまり、経過年数よりも交通量に影響を受け、今後も同様の環境条件ならば、中央環状線の方に注視する等、点検や補修の計画策定時において考慮すべき重要な事項となる。なお、大黒線においてはクラックの損傷は発見されていない。

鋼桁の腐食について考察すると、図-10に示す通りポ

アソン分布のフィットがよい。また、損傷発生期待値は、渋谷線と中央環状線の値が比較的大きい結果を得た。

表-2 対象路線の経過年数と交通量一覧

路線名 (単位)	延長 (km)	最大断面 交通量 (千台/日)	経過年数 (年)
渋谷線	11.9	107	46
上野線	4.4	32	42
中央環状線	19.4	160	26
大黒線	4.6	24	24
首都高平均	-	77	31

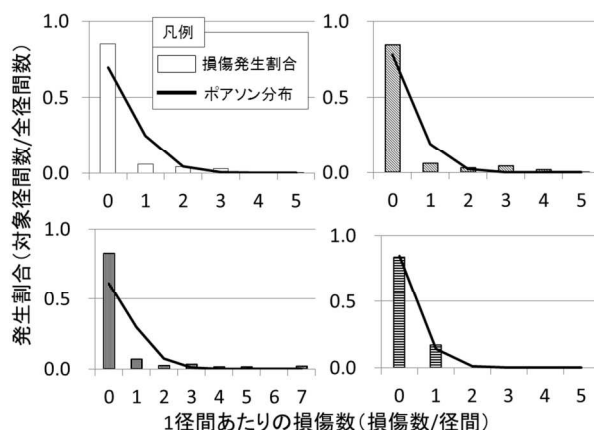


図-5 RC床板のひび割れについての損傷分布(左上:渋谷線、右上:上野線、左下:中央環状線、右下:大黒線)

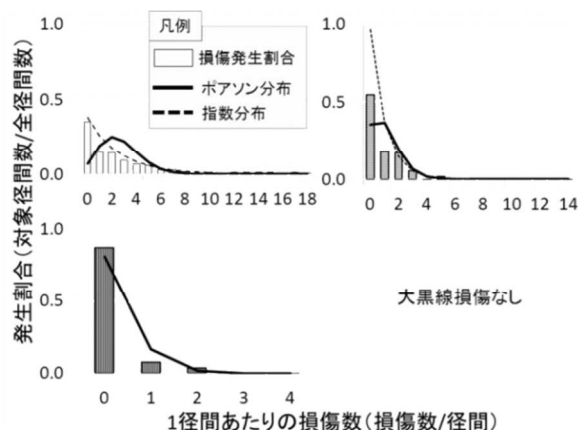


図-6 RC床板の剥離についての損傷分布(左上:渋谷線、右上:上野線、左下:中央環状線)

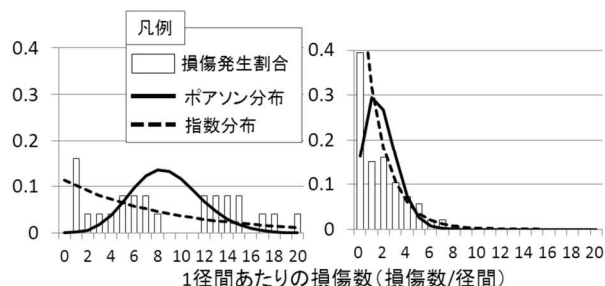


図-7 渋谷線のRC床板の剥離についての損傷分布(左: $t=16, 17\text{cm}$ 、右: $t=18\text{cm}$ 以上)

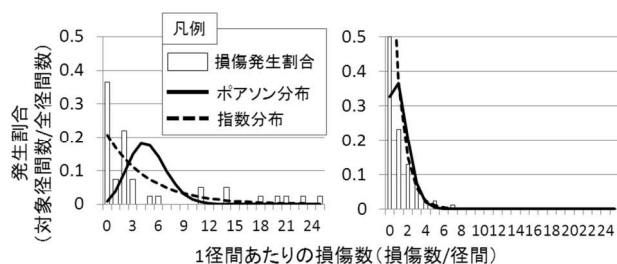


図-8 上野線のRC床板の剥離についての損傷分布(左: $t=16, 17\text{cm}$, 右: $t=18\text{cm}$ 以上)

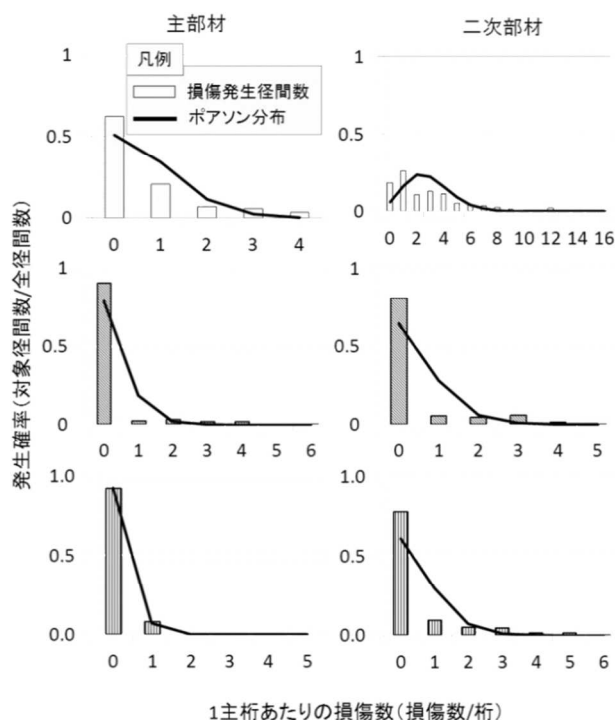


図-9 鋼桁のクラックについての損傷分布(左:主部材, 右:二次部材)(上:渋谷線, 中:上野線, 下:中央環状線)

腐食の要因となるのは水の供給であり、それは主として伸縮装置の損傷による漏水が考えられる。伸縮装置の損傷には交通量が起因することが考えられ、特に大型車交通量が多い路線であるこの2路線においては、伸縮装置の破損が他に比べ多く発生し、腐食に影響を及ぼしたと考えられる。すなわち、伸縮装置の損傷を未然に防ぐことは、通行車両の安全確保と構造物の劣化防止との両面から重要な要素である。

なお、これら損傷分布とポアソン分布の適合度を χ^2 検定にて行ったが、半数以上は有意水準0.05を確認できなかった。これは、ポアソン分布が事故等の生起確率が小さい現象に用いられるため、損傷の生起確率が小さいとは言えない場合、ケースや路線にもよるが具体的には1径間5か所以上発生している場合に、有意性は確認できないという傾向にある。

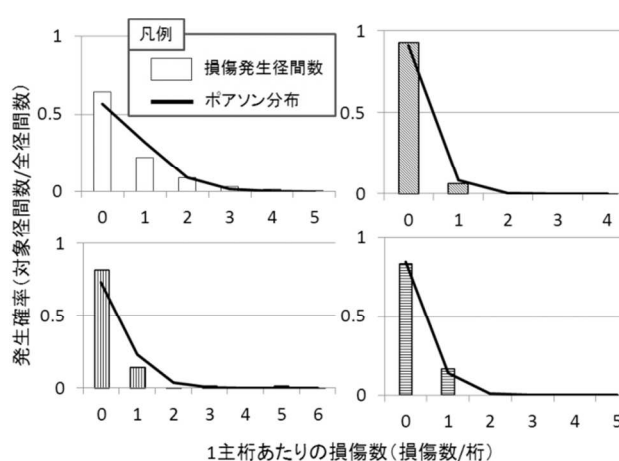


図-10 鋼桁の腐食についての損傷分布(左上:渋谷線, 右上:上野線, 左下:中央環状線, 右下:大黒線)

表-3 損傷別発生期待値一覧

		渋谷線	上野線	中央環状線	大黒線
RC床板	ひび割れ	0.315	0.245	0.489	0.167
	剥離	2.72	2.09	0.193	損傷なし
鋼桁	クラック(主部材)	0.719	0.240	0.078	損傷なし
	" (二次部材)	2.84	0.434	0.489	損傷なし
	腐食	0.567	0.093	0.312	0.167
対象径間数(径間)		222	140	233	6

4. 損傷要因分析

(1) 損傷要因分析の目的

図-11に渋谷線における桁・床板別の1径間あたり損傷分布を整理したものを示す。床板は鋼部材に多くの損傷が集中している。桁については渋谷-500付近を境に部材は鋼からコンクリートに変化するが、損傷発生傾向が異なる。このように、部材を構成する材料も損傷発生数に影響を及ぼしていると考えられ、このような影響を把握するために、ここでは重回帰分析を用い1径間あたりの損傷数との関係を定量的に示すことを目的とする。

(2) 重回帰分析の適用

重回帰分析を行うに当たっては、1径間当たりの損傷数を非説明変数 Y とし以下の(1)式を定義する。

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 S + \gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2 + \delta_1 k_1 + \delta_2 k_2 + \delta_3 k_3 + \delta_4 k_4 \quad (1)$$

なお各パラメータは以下の通りである。

X_1 : 大型車交通量 (台/日)

X_2 : 日平均走行速度 (km/h)

d_1 : 材料ダミー : 桁 (コンクリート桁:1, 鋼:0)
 d_2 : 材料ダミー : 床板 (コンクリート床板:1, 鋼:0)
 k_1 : 構造ダミー : 桁形状 (箱桁:1, 鉸桁:0)
 k_2 : 構造ダミー : 設計基準 (S39 以前:1, それ以外:0)
 k_3 : 構造ダミー : 特殊構造物 (損傷が多数発生している区間:1, それ以外:0)
 k_4 : 構造ダミー : 床板厚さ (18cm 以下:1, それ以上:0)
 S : 渋滞ダミー : ピーク時速度 (40km/h 未満:1, 40km/h 以上:0)
 Y_1 : 1 径間あたりの床板における損傷数 (件/径間)
 Y_2 : 1 主桁あたりの桁における損傷 (件/桁)

損傷の発生要因には経過年数も影響を与えていると考えられるが、本研究においては前述の4路線が開通後約45年および約25年と2極化し経過年数の影響を適正に表現できないことから、それに代わる指標としてS39年の設計基準かどうかにより判定を行うこととした。これは前述の通り、S39年以前の設計基準で設計された構造物は損傷が多く発生する傾向があり、それがどの程度影響するか把握することも目的とするためである。交通量についても同様に、今回は大型車交通量を採用したが、その理由として重量が大きい大型車交通量が疲労損傷に起因する¹²⁾とされており、普通車・大型車の両車を含めた交通量との相関が高く、重回帰分析においてはどちらかを取捨選択することが必要であったため、損傷により寄与すると考えられる大型車交通量を選択した。その他渋滞がどの損傷に影響するかを指標として評価する(S)。

(3) 床板の損傷要因分析の結果

床板における重回帰分析によって得られた結果を式(2)に示す。なお本解析における重相関係数および重決

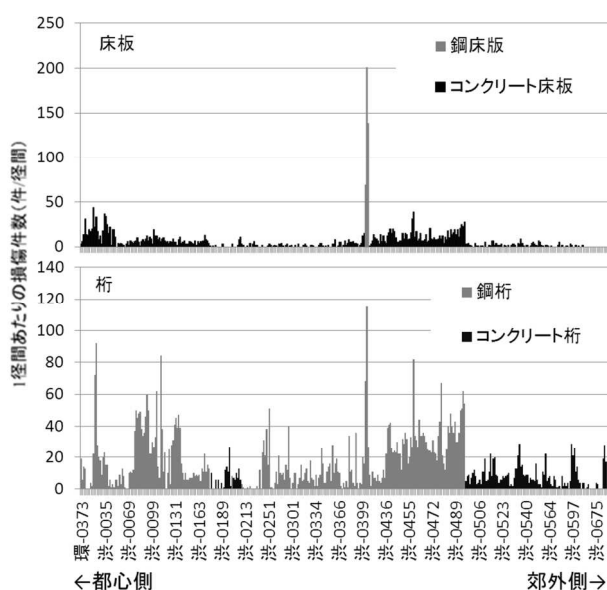


図-11 渋谷線の損傷分布

定係数はそれぞれ $R=0.69$, $R^2=0.48$ である。

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 4.28 - 0.96X_1 - 2.66X_2 + 1.58S - 0.25d_1 \\
 & (1.57) \quad (-3.15) \quad (-1.20) \quad (3.71) \quad (-0.43) \\
 & -0.18d_2 - 1.08k_1 + 1.67k_2 + 15.7k_3 + 4.08k_4 \quad (2) \\
 & (-0.20) \quad (-2.77) \quad (3.65) \quad (20.1) \quad (7.53)
 \end{aligned}$$

()内はt値

d_1, d_2 とも負の係数となり桁・床板ともコンクリート部材の方が損傷は発生しにくい結果を得た。これは、コンクリート床板と比較し鋼床板は軽量なため、交通による振動が生じやすく疲労損傷が発生しやすいという特徴を表現したものであると考える。また、 k_4 の影響も大きく薄い床板は損傷も発生しやすいことがこの結果からも分かる。

損傷が多く発生しているところを個別にみていくと、トラス橋等の特定した構造物に損傷が多く発生しており、それらを特殊構造物として k_3 で表現したが、それが最も影響していることが分かった。なお、これら特殊構造物として設計した区間は、上野線においてはRC床板の主鉄筋の間隔が本路線においての平均的な区間が200mm程度に対してより広い300mmとなっている区間、中央環状線においては鋼床板でそのデッキプレート補強リブの形状がUリブの区間、大黒線においては運河を渡河するトラス橋(大黒大橋)の区間であり、各路線において損傷が発生しやすい区間をいかに区別し特定できるかが、回帰式の構築に大きく影響する。

また、ピーク時速度が低いと損傷が発生しやすいという傾向が確認できた(S)。すなわち渋滞や混雑により1径間あたりの積載車両数、つまり車両荷重が増加し、それが損傷に影響するという結果につながったと考える。

なお、交通量の影響としてパラメータに設定した X_1 : 大型車交通量(台/日)については、負の係数となった。これは、上野線の大型車交通量が渋谷線の1割程度であるが、床板の損傷は渋谷線と同程度発生しており、その影響で大型車交通量が損傷件数に寄与しないという結果になったと考える。また、 X_2 から、走行速度については、負の係数となり走行速度が遅いと損傷が多く発生する傾向にはあるが、明確な因果関係はないと考えられる。

式(2)による損傷発生推定値と実損傷数との関係を図-12に示す。損傷が多く発生している区間である特殊構造物を、比較的特定できる上野線と中央環状線および大黒線の適合は比較的良いが、渋谷線の適合は良くない。

(4) 桁の損傷要因分析の結果

桁における重回帰分析によって得られた結果を式(3)に示す。なお本解析における重相関および重決定係数は

それぞれ $R=0.56$, $R^2=0.31$ である。

$$Y_2 = -2.51 + 1.22X_1 + 6.53X_2 + 2.39S - 2.94d_1 \quad (1.11) \quad (4.29) \quad (3.35) \quad (6.07) \quad (-5.35) \\ -5.64d_2 - 0.67k_1 + 1.62k_2 + 17.9k_3 - 0.49k_4 \quad (3) \\ (-7.42) \quad (-1.83) \quad (3.88) \quad (15.2) \quad (-1.06) \\ ()内はt値$$

d_1, d_2 とも負の係数となり床板同様、桁・床板ともコンクリート部材の方が損傷は発生しにくい結果を得た。その中でも、 d_1 が床板よりも大きく影響しており、コンクリート桁の方が損傷発生しにくく、また箱桁の方が損傷は少ないという結果を得た k_1 。

ここでも、 k_3 の値から損傷が多く発生している区間を特定することがモデルを構築することに大きな影響を及ぼすことが分かる。桁の損傷が特に多く発生している具体的な構造としては、渋谷線の場合は渋谷駅前に架設されているPC連続橋（片持手延工法区間）であり、中央環状線の場合はかつしかハープ橋と呼ばれるS字鋼斜張橋区間であり、これらは床板の発生傾向とは異なる。また、 k_4 の符号が床板と異なり、床板の薄さは桁の損傷には影響しないということが分かった。

その一方、ピーク時速度が低いと損傷が発生しやすいという傾向は床板と同様である(S)。

式(3)による推定値と発生損傷数との関係を図-13に示す。特殊構造物を比較的特定できる床板のケースよりも、損傷が多く発生していく区間を特定ができなかったため全体的にフィットがよくないことが分かる。

また、渋谷線と中央環状線の損傷は、その他の2路線に比べ全体的に多い。すなわち、路線単位で損傷をマクロ的にみると桁の損傷は、床板よりも交通量（大型車交通量）の影響を受けやすいことが考えられる。これは、パラメータに設定した X_1 の係数が床板は負に対して、桁は正の値を得たこと、そのt値も高いことから分かる。

また、 X_2 から、走行速度については、正の係数となり走行速度が速いと損傷が多く発生する傾向にはあるが、明確な因果関係はないと考えられる。

これらを踏まえ、材料的な要因(d_1, d_2)や渋滞の影響(S)以外は、損傷要因は床板と桁で異なる。

5.結論

(1) 損傷発生分析の結果

床板のひび割れの損傷分布は概ねポアソン分布とのフィットが良好という結果を得た。また交通量の多い路線において、ひび割れが発生しやすいことが分かった。その他、剥離の発生確率よりも小さく、今回抽出した4路

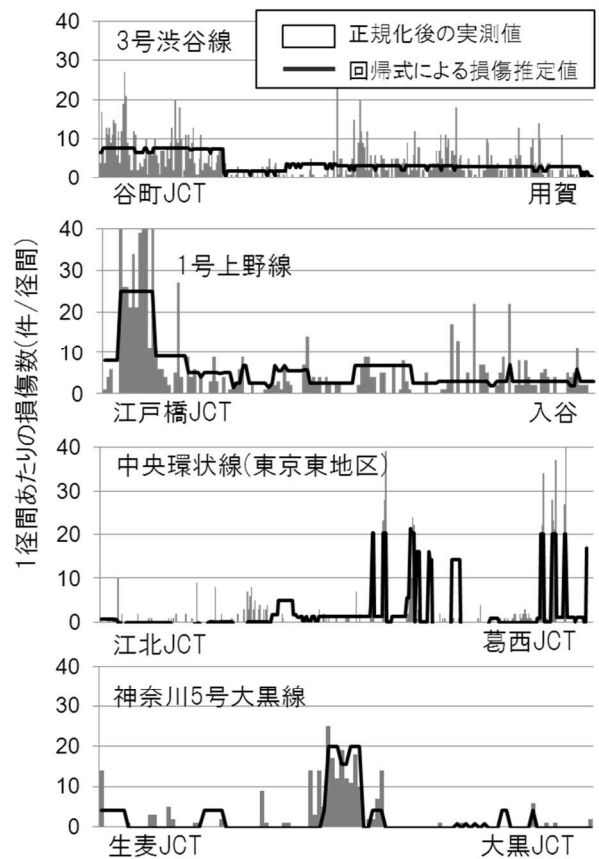


図-12 床板における損傷数と推定値との関係(上から渋谷線、上野線、中央環状線、大黒線)

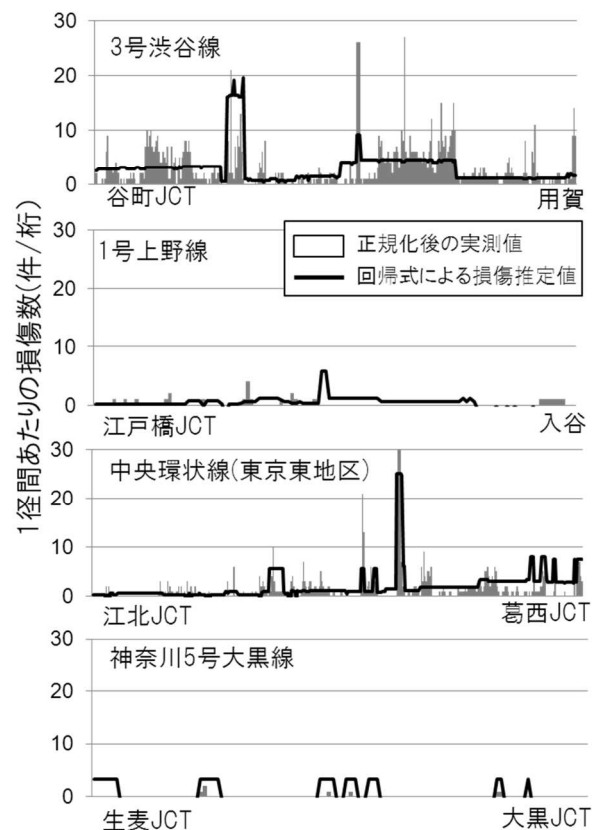


図-13 桁における損傷数と推定値との関係(上から、渋谷線、上野線、中央環状線、大黒線)

線においては、差がないことが分かった。

床板の剥離について分布は、経過年数が40年以上の路線においてはポアソン分布とのフィットが悪く、ランダムに損傷が発生してはいないという結果を得た。その理由として、剥離の損傷は床板の厚さに影響を受け、特に厚さが16cmおよび17cmの床板には剥離が多数発生しやすいことが分かった。

鋼桁のクラックについては、主部材と二次部材を区別することで、概ねポアソン分布に従うことが分かったが、渋谷線における二次部材のクラック発生は、ポアソン分布とのフィットが比較的悪いことから、ランダム発生ではないということが分かった。また、クラックには経過年数、交通量ともに影響を及ぼし、特に累積交通量が起因するということが分かった。また、交通量の方が経過年数と比較して損傷には影響を及ぼすことが分かった。

鋼桁の腐食の損傷分布は、比較的ポアソン分布とフィットが良好であるということが分かった。また、交通量が多い路線において腐食が発生しやすいという結果を得た。

(2) 損傷要因分析の結果

重回帰分析を用いた損傷要因分析からは、床板・桁ともコンクリート部材の方が損傷は発生しにくいことが分かった。その中でも、桁は床板よりも、コンクリートの損傷は少なくなる傾向である。また、床板の損傷にはその厚さが影響するが、桁には影響がないことが分かった。

床板、桁ともに損傷が発生しやすい特殊な構造物（区間）があり、それを正確に把握することが回帰式による推定値と実損傷数の再現には重要であるということが分かった。その一方、損傷が発生しやすい構造物は、床板と桁では異なるということも分かった。

ピーク時の走行速度が40km/h未満となる区間、すなわち渋滞や混雑が発生しやすい区間においては損傷が発生しやすく、交通量の影響は桁の方が床板に比べ受けやすいということが分かった。その他、走行速度については明確な因果関係はないということが分かった。

6.今後の課題

損傷発生分析においては、ポアソン分布のフィットが悪い要因となっている損傷多発生径間の特性を把握し、損傷多発径間と一般部を区別し、発生分布を確認していく他、今回対象としなかった他の断面において分析を行いたいと考えている。

また、発生要因分析において作成した桁と床板の路線ごとの径間単位の損傷数は、損傷発生分析に行った損傷分類ではなく、桁・床板の損傷すべてを対象としている。

損傷は種類で発生傾向が異なることが本研究からも分かっているので、今後は損傷を分類して発生傾向を分析し、損傷に起因する要因の把握を実施することとする。

謝辞：本論文を作成するに当たり、首都高速道路株式会社から資料の提供等多大な協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 小澤隆道:路維持管理の現状と課題,「レファレンス」H19.4
- 2) 小林潔司, 上田孝行:インフラストラクチャ・マネジメント研究の課題と展望,土木学会論文集 No.744/IV-61, pp.15-27, 2003.10
- 3) 慈道充, 小林潔司:不確実性下における最適点検・修繕ルール,土木学会論文集 No.744/IV-61, pp.39-50, 2003.10
- 4) 貝戸清之, 阿部允, 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/IV-61, pp.29-38, 2003.10
- 5) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司:橋梁劣化予測のためのマルコフ確率の推定,土木学会論文集 No.801/I-73, pp.69-82, 2005.10
- 6) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司:劣化予測のためのハザードモデルの推計,土木学会論文集 No.791/IV-67, pp.111-124, 2005.6
- 7) 例えば「東京都道路アセットマネジメント～予防保全型管理を実現するために～」
(<http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/asset/index.htm>)
- 8) 首都高速道路(株):首都高速道路構造物の大規模更新のあり方に関する調査研究委員会
(<http://www.shutoko.co.jp/company/enterprise/road/largescale>)
- 9) 首都高速道路(株):「構造物等点検要領」2012
- 10) 首都高速道路(株):「保全情報管理システム (MEMTIS)」パンフレット
- 11) 池守昌幸:「土木計画のための確率・統計序説」,森北出版, 1985
- 12) 日本鋼構造協会:「土木鋼構造物の点検・診断対策技術」2011
- 13) 首都高速道路(株):第 26 回首都高速道路交通起終点調査報告書, H21.1