

論文 赤外線サーモグラフィ法を用いた損傷抽出結果に基づく橋梁コンクリートの劣化定量分析

高畑 東志明^{*1}・橋本 和明^{*2}・林 和彦^{*3}・石田 哲也^{*4}

要旨：本研究では、第三者被害対策として行っている赤外線調査の熱画像データにより、コンクリート構造物である橋梁の劣化特性や進行性に影響を及ぼす因子を把握し、維持管理の効率化に活用することを目的とする。赤外線サーモグラフィ法により得られた熱画像の定量情報に対して生存時間解析による定量分析を行った結果、初期欠陥が存在する箇所はコンクリート表層部の物質移動抵抗性が低いため、健全部とは劣化進行が異なり早期に劣化することを示した。本分析結果は、施工時の品質管理の重要性を示唆するものであり、維持管理においては補修計画策定時の基礎資料として予防保全に寄与するものである。

キーワード：赤外線サーモグラフィ法, 非破壊検査, コンクリート表面, 剥落, 予測手法

1. はじめに

1.1 研究の背景

現在、社会資本の老朽化による点検量の増大や点検員の不足などが懸念される中、点検結果の信頼性の向上が課題となっている。また、点検対象となる構造物は数多く存在するため、点検にかかるコストの縮減や効率的な点検方法が求められており、多くの機関でより合理的な点検・診断手法の検討が取り組まれている。コンクリート構造物である橋梁の変状は、技術基準類の変遷による仕様や形式などの違い、あるいは立地によるコンクリートの使用材料や気象・使用条件（交通量など）の違いなど多数の要因が相互に関係するため、多種の損傷が様々な箇所に発現する。道路管理者はこのような劣化進行の解明のため、点検履歴や物性試験結果から劣化特性や因子について検討しているが、劣化進行に支配的な因子を解明することが重要である。

1.2 研究の目的

著者らは、コンクリート片の落下による第三者被害を未然に防ぐため、コンクリート橋を診断対象とした赤外線サーモグラフィ法による非破壊調査（以下、赤外線調査という）を実施しており、その後実施する打音点検のスクリーニングや点検時に注意すべき箇所を抽出することで合理的な維持管理や点検の信頼性向上を図ってきた。赤外線調査の結果は、コンクリート内部に生じる損傷部の大きさや深さなどの劣化程度を捉えることが可能で、特に鉄筋腐食などによる進行性の浮き・剥離を早期発見する手段として有用である¹⁾。著者らは既報²⁾において、四国地方の高速道路橋において、赤外線法による熱画像の定量情報を用いた生存時間分析を行い、橋種や部位別

に浮き・剥離の発生リスクを定量化し、劣化因子となる構造条件や環境条件の影響について知見を得た。

過去の点検履歴から四国地方の高速道路橋の劣化傾向を整理すると、空洞や豆板などの初期欠陥がきっかけとなって劣化が進行する事象が確認されている。そこで、気象条件や供用年数などの条件が異なる2つのインターチェンジ間（区間A, B）において、豆板、段差、ノロ、空洞、砂すじ、ひび割れを初期欠陥とし、初期欠陥が存在する径間と無い径間の浮き・剥離の箇所数を比較した結果を表-1に示す。気象条件や供用年数などが等しい同一区間内であっても、初期欠陥が存在する径間では、浮き・剥離の発生頻度が高いことがわかる。

細田らの研究³⁾によると施工の基本事項の遵守がひび割れ抑制に繋がり、コンクリートの表層が緻密で物質移動抵抗性が高く、かぶりが確保されていれば劣化因子の侵入が抑制され、コンクリート構造物の耐久性が向上するとされている。表-1はコンクリート表層部の緻密性や均一性などの初期状態のコンクリートの品質が、その後の中性化や塩害の進行に影響を及ぼし、腐食ひび割れの進展による浮き・剥離が生じたためと考えられる。

そこで本研究では、今後の予防保全に寄与する維持管理への活用を目的とし、既往研究²⁾の分析データを拡充し、説明変数に劣化進行に影響のある因子としてコンク

表-1 初期欠陥の有無による浮き・剥離の比較

径間における初期欠陥の有無	区間	径間数 (a)	浮き・剥離の箇所数 (b)	1径間あたりの浮き・剥離箇所数 (b/a)
無し	A	54	2	0.037
	B	133	0	0.000
有り	A	28	38	1.357
	B	80	68	0.850

*1 西日本高速道路エンジニアリング四国（株） 土木事業本部土木技術部統計分析課（正会員）

*2 西日本高速道路エンジニアリング四国（株） 土木事業本部土木技術部副部長 博（工）（正会員）

*3 香川高等専門学校 建設環境工学科 准教授 博（工）（正会員）

*4 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授 博（工）（正会員）

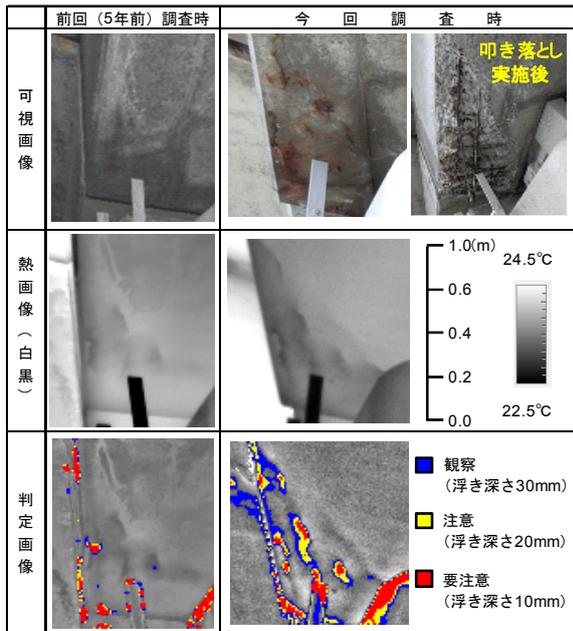


図-1 赤外線による剥離領域の検出例

表-2 赤外線調査の判定区分

区分	損傷の状況
観察	損傷程度低
注意	損傷程度中
要注意	損傷程度高, 打音点検対象領域

リート表層の品質を示す初期欠陥を追加したデータを用いて、生存時間解析を行う。

2. 赤外線法による熱画像の定量情報

赤外線調査は非破壊検査手法の一つとして、多くの構造物に適用されている。しかし、従来の赤外線サーモグラフィ法では、表面から何 mm の深さで温度差が出ているのかは判らないため、実際の剥落の危険度を評価するのは難しく、打音点検箇所を絞り込むことが出来なかった。林らは取得した熱画像に対し、画像フィルター処理技術を用いることで診断結果を定量的に評価するシステムを提案している¹⁾。同システムによる剥離領域の検出精度について、中村らが開発した供試体載荷装置⁴⁾を用いた室内実験の結果、コンクリート表層部の剥離領域を判定色にて3段階に評価できることを確認している。次に同システムを四国地方の高速道路橋に適用した例として、赤外線法による同一個所の剥離領域の進行抽出例を図-1、赤外線調査の判定区分を表-2に示す。図-1の判定画像は検出された温度差が表面からどの程度の深さにあるのかを3段階で表しており、表面に近いほど剥落の危険性が高く、表面から深さ10mm以内を要注意としている。前回(5年前)調査時は赤外線調査で要注意であったが、打音点検の結果、異音が確認されたものの叩き落としには至らなかった。5年経過後の今回調査では赤外線調査後に実施した打音点検にて床版端部の剥離領域

にて叩き落としを実施した。

このように赤外線調査による熱画像の定量情報は、目視点検のみでは把握できないコンクリートの剥離領域の劣化進行を定量的に把握できる時系列データであり、小さな空洞やノロに隠れた豆板などの発見しにくい損傷を見つけ出すこともできる。よって、これらのデータを生存時間解析の分析データとして用いることとした。

3. 分析方法

3.1 初期欠陥の定義

コンクリート構造物は中性化、塩害、凍害、鉄筋の腐食、アルカリシリカ反応などの化学的作用や、疲労などの物理的作用によって劣化が進行する。しかし、この他の要因として施工由来の欠陥が存在する。施工時においては型枠・鉄筋組立、コンクリートの製造、運搬、打設、締め、養生及び型枠脱型時のミスが原因でコンクリートの品質が確保できていない場合がある。コンクリートが密実でなく、ひび割れ等の初期欠陥があると、水や酸素、塩分などの劣化因子の侵入が容易となり、鉄筋が腐食しやすくなるとされている(図-2)。コンクリート標準示方書の維持管理編では初期欠陥を「ひび割れ、豆板、コールドジョイント、砂すじなど」としており、施工編では表面状態の検査として、「凹凸、表面気泡、色むらがある箇所」についても目視で検査することとしている。

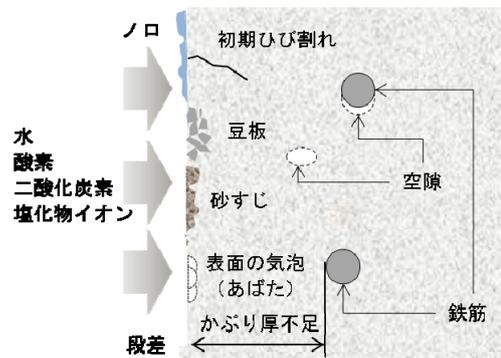


図-2 緻密でないコンクリートに生じる初期欠陥の例

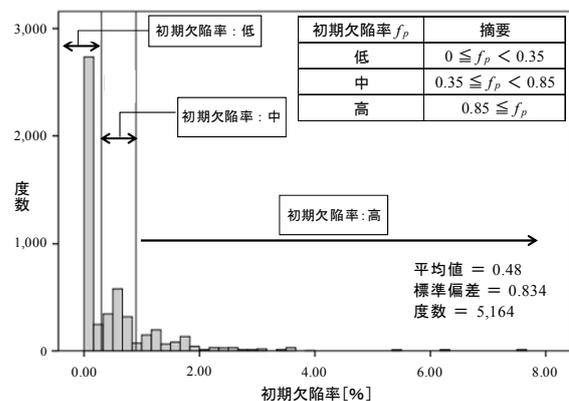


図-3 初期欠陥率別の分析データのヒストグラム

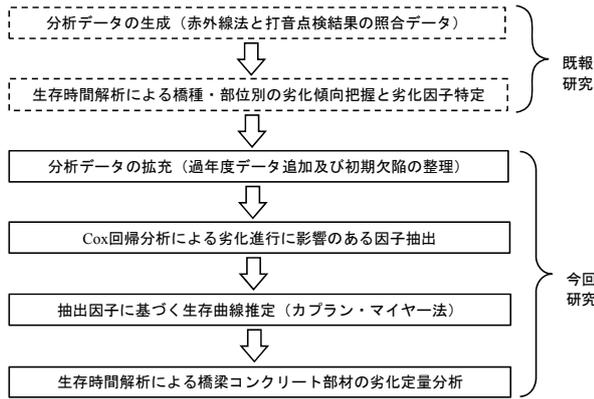


図-4 分析のフロー

以上の見解を踏まえ、本研究では維持管理時に確認された浮き・剥離以外の変状のうち、コンクリート標準示方書に記載されている欠陥の中で影響度が高いと思われる豆板、段差、ノロ、空洞、砂すじ、ひび割れを初期欠陥と定義した。なお、ひび割れについては四国地方の供用条件として交通量が少なく、疲労ひび割れの発現が少ないことから本研究では初期欠陥に含むこととした。

また、この計6種類の変状について橋梁径間毎に集計し、径間面積で除した値をその径間の初期欠陥率として設定した。初期欠陥率別の分析データのヒストグラムを図-3に示す。グラフ形状から大きく分けて3つの山に分かれていることから3グループに分類するものとし、初期欠陥率 (f_p) が低いグループを $0 \leq f_p < 0.35$ 、中程度のグループを $0.35 \leq f_p < 0.85$ 、高いグループを $0.85 \leq f_p$ と本研究では分類した。データの総数は5,164件であり、初期欠陥率が低いグループは3,013件、中程度のグループは1,206件、高いグループは945件であった。部位区分はどのグループにおいても床版・桁が6~7割を占めており、壁高欄と床版・桁端、水切部の割合はほぼ同じであった。

3.2 分析手順

図-4に分析の流れを示す。山崎らは医療系の臨床研究などでよく用いられる生存時間解析を東北地方の橋梁にて適用した研究⁵⁾を行っており、排水施設種別や防水工の有無などといった構造的な条件や、凍結防止剤散布量や季節別の降水量など環境的な条件を説明変数として設定し、 Kaplan-Meier法を用いた生存曲線推定及びCox回帰分析を用いたハザード比による劣化因子の定量的な評価手法を示している。既報²⁾では、赤外線調査で打音点検対象となった変状に対して打音点検結果を照合させた点検履歴を整理し、劣化因子となる各変数を整理した分析データを生成した。橋梁種別及び部位別の生存曲線推定結果から、四国地方の高速道路橋において、剥離に伴う変状が25年を超過すると顕在化し、床版・桁端部の劣化速度が著しく大きい結果を得た。また、Cox回帰分析結果から構造条件においてはRC橋で床版・桁端

表-3 分析データ

項目	データ概要
赤外線調査期間	2009年 — 2015年
橋梁種別	鋼橋 (コンクリート床版), RC橋, PC橋, PC箱桁橋
部材種別	床版・桁, 床版・桁端, 張出部, 壁高欄, 水切部
橋梁サンプル数	鋼橋 63橋, RC橋 107橋, PC橋 85橋, PC箱桁橋 4橋
所在地	四国4県 (徳島, 香川, 愛媛, 高知)

表-4 分析に用いる各変数

変数名		単位/コード	
目的変数	橋齢	年	
	打音点検時における剥離領域の判定	0 = 健全 (下記以外の変状) 1 = 浮き・剥離	
数値型説明変数	構造条件	径間面積	m ²
		径間長	m
		損傷の大きさ	m ²
		初期欠陥率	箇所/m ² 径間毎の初期欠陥の箇所数を径間面積で除した値
	環境条件	年降水量	mm
		凍結防止剤散布量	t/km IC間ごとの3ヵ年平均散布量
		春期降水量	mm/年 3月~5月の累積年平均降水量
		夏期降水量	mm/年 6月~8月の累積年平均降水量
		秋期降水量	mm/年 9月~11月の累積年平均降水量
		冬期降水量	mm/年 12月~翌2月の累積年平均降水量
カテゴリ型説明変数	構造条件	鋼橋	
		橋種区分	RC橋 PC橋+PC箱桁橋
	部位区分	壁高欄	
		床版・桁 床版・桁端, 水切部	

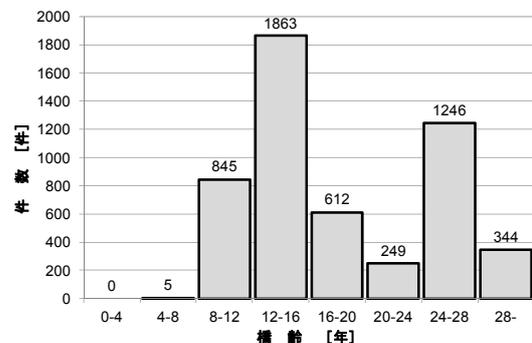


図-5 橋齢別の分析データのヒストグラム

部の劣化が速く、環境条件においては冬期降水量が凍結防止剤の散布を助長することから、リスクを増大させる因子であることが判明し、逆に夏期降水量は凍結防止剤の徐塩を促す効果からリスクを低減させることが判った。

本分析では既往研究の分析データを拡充するとともに、劣化進行への影響が想定される初期欠陥率を追加した。また、先行して生存時間解析であるCox回帰分析による劣化要因の抽出を行い、既往研究の抽出結果に基づき Kaplan-Meier法を用いた生存曲線推定を行った。

3.3 分析データの概要

分析データの概要を表-3に示す。本研究に用いる分

析データは、2009年から2015年上半期までに実施した赤外線法による調査結果のうち、赤外線調査において特異な温度差を検出した要注意箇所（浮き深さ10mm以下）の総数5,164件である。本分析に用いる変数を表-4に示す。目的変数は分析毎に定義することとし、ここでは劣化進行への影響が想定される説明変数について述べる。構造条件については損傷の大きさや表面状態、初期欠陥率など変状箇所の特徴を示す項目、環境条件については年間・季節別降水量や凍結防止剤散布量など劣化要因として想定される項目を設定し、データを集計した。本データの橋齢を図-5に示す。なお、四国地方の高速道路橋における橋齢は最大30年であり、道路橋示方書の変遷に影響しないことから、本分析では設計かぶり厚の影響については考慮しない。

4. Cox 回帰分析を用いた劣化要因の推定

4.1 Cox 回帰分析の概要

四国地方における橋梁コンクリートの劣化要因を推定するため、医療分野などで時系列データの解析によく用いられるCox回帰分析を適用する。比例ハザードモデルでは、部分尤度は観測された生存時間とモデルの線形成分にある未知のパラメータ β の関数であり、 β の推定値は観測されたデータの最尤推定値となる。 β は部分尤度 $L(\beta)$ を使用し、部分尤度の最大化を行うことにより推定される。既報⁵⁾及び文献⁶⁾より、部分尤度 $L(\beta)$ は次式(1)により表される。

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{\exp(\beta' x_i)}{\sum_{l \in R(t_i)} \exp(\beta' x_l)} \right\}^{\delta_i} \quad (1)$$

本式により、被験者 l の時点 t_i でのリスク集合に対する説明変数 x_i をもつ被験者の死亡のハザード比を得る。

4.2 目的変数の定義

本分析における目的変数は、赤外線調査にて検出した時点の変状箇所を1サンプルとし、被験対象の死亡は、「浮き・剥離」の変状が確認された時点とした。前述のとおり赤外線調査において検出した変状のうち、要注意と判定した変状については打音点検を実施し、未然に剥落の懸念があるコンクリート片を叩き落している。ここでは、打音点検結果のうち、「浮き・剥離」以外の変状を生存と

して定義した。分析は表-4の変数を説明変数としてCox回帰分析を行い、変数減少（ステップワイズWald）法により劣化要因を特定した。なお、本分析は統計解析ソフトSPSSを使用した。

4.3 分析結果

橋梁コンクリートの劣化進行への影響が懸念される因子について分析を行った。説明変数は大きく構造条件と環境条件とし、構造条件の説明変数を橋種、損傷部位、径間面積、径間長、損傷の大きさ、初期欠陥率とし、環境条件の説明変数を年降水量、季節別降水量、凍結防止剤散布量とした。Cox回帰分析の結果を表-5に示す。回帰係数 β は既報²⁾と比較すると、部位区分と橋種区分で値が大きくなったが、傾向としては同様の傾向を得た。ハザード比は、任意の一定期間における浮き・剥離発生率の比であり、説明変数が単位量増加した際に何倍になるかを示している。山崎らによる研究⁵⁾では、東北地方の橋梁点検データを基に生存時間解析を実施した結果、季節別降水量と凍結防止剤散布量が損傷発生リスクに強い影響を与えていると指摘しており、夏期降水量と秋期降水量はリスクを低減させる因子、春期降水量と冬期降水量は悪影響を及ぼす因子としている。本分析では、秋期降水量と凍結防止剤散布量は変数減少法により除外され、それ以外は類似した傾向を得たものの、ハザード比は1.00前後と影響は少ない。Wald統計量は、対象となる説明変数について、係数を0にしてもよいという帰無仮説に対して計算される値であり、値が大きいと帰無仮説が棄却され、その説明変数が有効であることを示す。以上の結果から、カプラン・マイヤー法による生存曲線推定はハザード比の高い部位区分と、Wald統計量の値が大きい初期欠陥率の影響について検討する。

5. カプラン・マイヤー法を用いた生存曲線の推定

5.1 カプラン・マイヤー法

生存時間解析とは、明瞭な起点から特定のイベントや終点までの時間という形のデータに対する解析をいう。カプラン・マイヤー法の多くは医学・薬学分野において被験者への臨床試験に多く用いられている。土木工学へ適用された事例としては、山崎らによる研究があり⁵⁾、既報²⁾はこの研究を大いに参考にしている。被験対象が健全な状態である期間（生存時間 t ）は、非負の値を取る変数 T の実現値と捉え、 T を生存時間を表す確率変数とよぶ。ここで、確率変数 T は確率密度関数が $f(t)$ である確率分布に従うとする。このとき、 T の分布関数 $F(t)$ は、次の式(2)で与えられ、被験対象が時点 t を越えて生存できない確率を表す。なお式中の u は積分変数とする。

$$F(t) = P(T < t) = \int_0^t f(u) du \quad (2)$$

表-5 Cox 回帰分析結果

	回帰係数 β	Wald統計量	有意確率	ハザード比
部位区分		20.490	0.000	
床版・桁端、水切部	0.904	20.400	0.000	2.470
床版・桁	0.723	15.155	0.000	2.062
橋種区分		6.366	0.041	
鋼橋	-0.521	5.595	0.018	0.594
PC橋+PC箱桁橋	0.043	0.159	0.690	1.044
春期降水量	0.004	9.132	0.003	1.004
夏期降水量	-0.010	47.184	0.000	0.990
冬期降水量	0.036	120.600	0.000	1.036
初期欠陥率	0.531	247.857	0.000	1.701

生存関数 $S(t)$ は次の式(3)のとおり、生存時間が t 以上となる確率である。したがって生存関数は、被験対象が時点 t を越えて生存する確率を表す。

$$S(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) \quad (3)$$

ハザード関数 $h(t)$ は、被験者が時点 t まで生存したという条件のもとでその時間に死亡する確率（瞬間死亡率）を表し、次式(4)により得る。

$$h(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left\{ \frac{P(t \leq T < t + \delta t | T \geq t)}{\delta t} \right\} = \frac{f(t)}{S(t)} = -\frac{d}{dt} \{\log S(t)\} \quad (4)$$

累積ハザード関数 $H(t)$ は、生存関数から求められ、次式(5)により表す。

$$H(t) = \int_0^t f(u) du = -\log S(t) \quad (5)$$

観測時間内のデータ群において、 $t_{(k)}$ から $t_{(k+1)}$ 番目までの k 番目の任意の時点 t における生存関数の推定値は、 $t_{(k)}$ を越えて生存する確率の推定値となる。 Kaplan-Meierによる推定値 $\hat{S}(t)$ は次式(6)で表され、条件付確率を推定し、その積で全数の生存関数を推定する。

$$\hat{S}(t) = \prod_{j=1}^k \left(\frac{n_j - d_j}{n_j} \right) \quad (6)$$

ただし、 $t < t_{(1)}$ のとき $\hat{S}(t) = 1$ 、 $t_{(r+1)} = \infty$

j : 順序付けた生存時間 ($j=1, \dots, r$)

n_j : 死亡のリスク集合に入る被験者総数

d_j : この時間で死亡する数

5.2 目的変数の定義

本研究では、橋梁コンクリートが浮き・剥離に至るまでの発生（生存）時間の特定を目的とし、本事象の発生に起因する劣化因子の影響について検証するため、Kaplan-Meier法による分類別の生存曲線の推定を行う。なお、本分析における目的変数である死亡の定義は、Cox回帰分析と同様とする。本分析もSPSSを使用した。

5.3 分析結果

初期状態のコンクリート品質によって、生存曲線に違いがあるかを確認するため、Cox回帰分析結果に基づき、

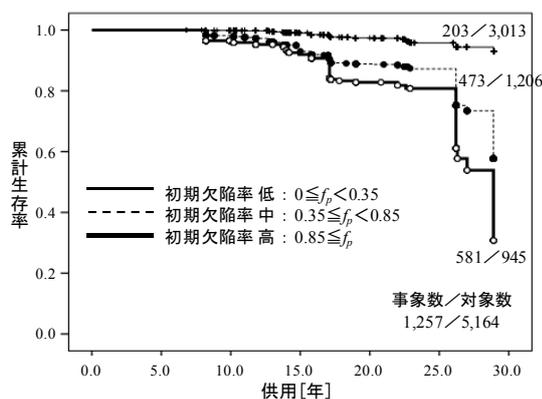
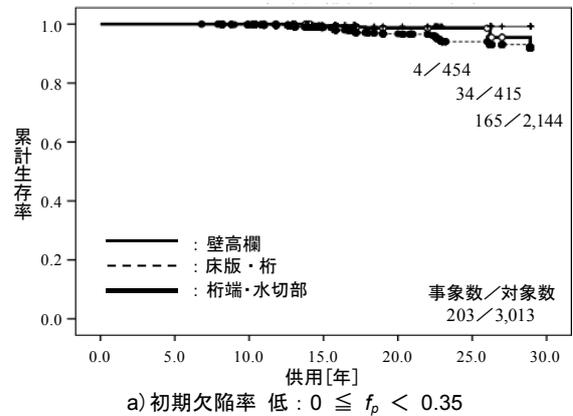


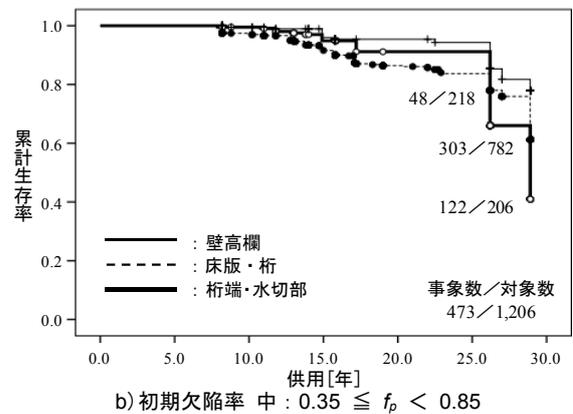
図-6 初期欠陥率の区分による生存曲線

Kaplan-Meier法を用いて生存曲線を推定した。本分析のログランク検定結果は、各群全て5%未満となり、複数群の母生存関数には優位な差がある。

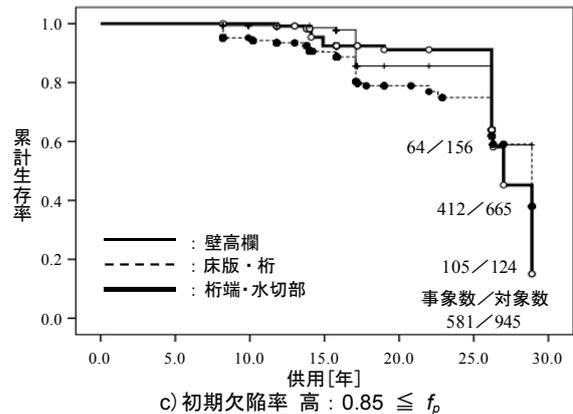
はじめに初期欠陥率別の生存曲線を図-6に示す。初期欠陥率の分類は、初期欠陥率を図-3の3つにグレード分けしたものである。本推定から、初期欠陥率が低い場合は、橋齢が30年を超過しても、「浮き・剥離」の発生リスクが小さい。一方、初期欠陥率が中及び高い場合は、橋齢が25年を超過すると「浮き・剥離」の発生リスクが増大する。つまり、初期欠陥は橋梁コンクリートの劣化進行に大きく影響していることが点検・調査履歴から導かれたことになる。初期欠陥グレード毎の部位別の生存曲線を図-7に示す。分類は一般部である「床版・桁」、「壁高欄」、及び水の介在が懸念される「床版・桁端、水



a) 初期欠陥率 低: $0 \leq f_p < 0.35$



b) 初期欠陥率 中: $0.35 \leq f_p < 0.85$



c) 初期欠陥率 高: $0.85 \leq f_p$

図-7 初期欠陥グレード毎の部位別生存曲線

切部」の3つとする。初期欠陥率が低い場合（図-7 a）は、部位に係らず劣化進行が遅い。これはコンクリートの品質が良く緻密性が高いことがうかがえる。また、初期欠陥率が中程度（図-7 b）になると床版・桁の生存率が15年経過後から徐々に低下し、25年を超過すると生存率6割に至る。また、床版・桁端、水切部は25年経過後まで生存率9割以上を維持しているが、25年を超過すると生存率4割となる。注目すべきは初期欠陥率が高い場合（図-7 c）で、壁高欄は、25年時点で生存率が6割に低下する。床版・桁は15年経過から生存率が低下し、25年を超過すると生存率が4割を下回る。また、床版・桁端、水切部は25年を超過すると生存率2割を下回る。これは床版などのかぶり厚の薄い箇所はコンクリート表層部の品質の影響を受け易いためだと推測される。最後に、表-6に生存曲線の推定から導いた分類毎の累積生存確率を経過年数時点で整理した。本表は初期欠陥と劣化進行の関係性や浮き・剥離の発生リスクを定量化したものである。

以上、本推定結果から初期欠陥率は供用後の劣化進行に大きな影響を与えることが判った。床版・桁端や水切部については伸縮装置の機能低下に伴う漏水などにより、部分的な損傷が顕在化することは既知であったが、一般部においてもコンクリートが密実でないと、劣化進行により浮き・剥離の発生リスクが高まる知見を得た。本結果は、点検・調査時の重点箇所の特定や、橋梁の健全度評価など、今後のコンクリート構造物の予防保全に活用できる。また、本分析で初期欠陥と定義した変状は、いずれも施工時に生じる可能性のある変状であり、施工段階でのコンクリートの品質確保の重要性を改めて認識することができた。

今後の課題として、初期欠陥率の高い橋梁の物性値の確認を挙げる。すなわち、初期欠陥と判定した部位においてコンクリート性状調査を実施し、表面吸水試験等によるコンクリート表層の物質移動抵抗性の確認⁷⁾、及び中性化試験など各種物性試験を実施し、コンクリート品質と劣化進行の関係性を明らかにする必要がある。

6. まとめ

本研究では生存時間解析を採用し、劣化因子をCox回帰分析で抽出後、初期欠陥の有無が部位別の浮き・剥離発生リスクに与える影響を定量化した。本研究で得られ

表-6 カテゴリ別の分類毎生存確率

初期欠陥率	部位区分	累積生存率				
		10年	15年	20年	25年	30年
低	壁高欄	100.0%	99.7%	99.2%	99.2%	99.2%
	床版・桁	99.8%	98.8%	96.7%	94.1%	92.3%
	床版・桁端、水切部	100.0%	99.3%	98.6%	98.6%	91.8%
中	壁高欄	99.5%	96.0%	95.4%	94.3%	77.9%
	床版・桁	97.4%	92.5%	86.4%	83.7%	61.2%
	床版・桁端、水切部	99.5%	94.9%	91.1%	91.1%	41.0%
高	壁高欄	99.4%	98.6%	85.6%	58.9%	58.9%
	床版・桁	95.2%	90.3%	78.9%	74.9%	38.0%
	床版・桁端、水切部	100.0%	92.5%	91.1%	91.1%	15.1%

た知見を以下に示す。

- (1) 赤外線調査の熱画像定量情報は打音点検のスクリーニングだけでなく、目視点検では検出困難なコンクリート内部の初期欠陥箇所の検出に有効である。
- (2) 供用中に確認された変状のうち、豆板、段差、ノロ、空洞、砂すじ、ひび割れを径間毎に集計し、径間面積で徐した値を初期欠陥率として設定することで、劣化定量分析が可能になることを示した。
- (3) 初期欠陥率が低いと部位にかかわらず、浮き・剥離の発生リスクが低く、初期欠陥率が中程度になると、25年経過後に著しく発生リスクが増大する。
- (4) 初期欠陥率が高いと、床版よりかぶり厚の大きい壁高欄でも25年経過後の生存率が6割を下回る。

今後の課題として、剥落対策や叩き落としなどの予防保全に活用するため、初期欠陥率やコンクリート表層部の物質移動抵抗性と部位別の最適な予防措置法や時期の関係を整理し明確化する必要がある。

参考文献

- 1) 林詳悟, 橋本和明, 明石行雄: 赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート損傷の検出精度向上, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp. 1813-1818, 2013.7
- 2) 橋爪謙治, 橋本和明, 松田靖博, 石田哲也, 高谷哲: 赤外線サーモグラフィ法を用いた四国地方における橋梁コンクリートに発生する剥離領域の劣化定量分析, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.16, pp.9-14, 2016.11
- 3) 細田暁, 二宮純, 田村隆弘, 林和彦: ひび割れ抑制システムによるコンクリート構造物のひび割れ低減と表層品質の向上, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp. 336-355, 2014
- 4) 中村繁貴, 高谷哲, 坂口和也, 山本貴士, 宮川豊章: 測定温度環境が赤外線サーモグラフィによるはく落予測モデルに与える影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.12, pp.357-362, 2012.11
- 5) 山崎崇央, 石田哲也: 生存時間解析を用いた東北地方における橋梁コンクリート部材の劣化定量分析, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.71, No.4, pp. I_11- I_22, 2015
- 6) David Collett 著, 宮岡悦良監訳ほか: 医薬統計のための生存時間データ解析, 共立出版, 2013
- 7) 林和彦, 細田暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013