

道路橋の点検の省力化・高度化に関する研究

(指導期間 令和5年4月～令和6年3月)

研究室名 橋梁研究室

氏 名 恵良 将主

1. まえがき

道路橋の定期点検では、診断を行う者が、構造物の状態の把握（点検）から措置の必要性についての所見の提示（診断）までの一連を行うことが求められている。状態の把握は、現地にて構造物に近接して行うことが原則とされているが、表-1 に示すような課題も指摘されている。そこで、平成31年の定期点検要領では、引張材の損傷事例など、点検の留意点に関する情報の充実が図られた。また、小規模な橋での作業負担の軽減の観点から、小規模な橋の中でも構造的に落橋のリスクが小さかったり、形状が単純で変状の見逃しの可能性が低い溝橋などで、必ずしも近接によらなくても診断に必要な情報を充足させられる場合があることが紹介された。

表-1 課題の整理

課題
(1) 見えない部位・変状がある
(2) 外観に変状が現れても評価・考察が難しい部位・変状がある
(3) 橋梁規模や構造、交差物件等の関係から作業負担が大きくなる
(4) 構造物全体をくまなく近接目視することを求めたときに、目的や部位によっては過剰となる場合がある

これらは、部材の重要度や損傷が生じたときに橋全体系の安定に与える影響、修繕の難易度、および構造の特徴や部材等の形状を考慮することで、診断に必要な情報を充足させつつ、作業負担の軽減を図れるように点検の方法を適切に選ぶという考え方がとられたものである。しかし、現在、様々な例示はされているものの、任意の橋に対して、構造や劣化の特性を考慮して点検の方法を選ぶ方法論が一般化されていない。一般化を行うことで、必要な部位では近接目視に加えて別途の解体調査や点検支援技術などを用いてさらに詳細に状態を把握することや、必ずしも近接せずに点検支援技術などを用い、点検の作業を省力化することの説明性の向上が実現できると考えられる。

そこで、診断に必要な情報の充足性という観点から、統一的な体系で、かつ、客観性をもって点検方法の選択や組み合わせ方を説明できる方法論について検討した。

2. 維持管理リスクの評価方法と情報の充足方法

本稿では、部材等の異常を見逃したり過小評価したりしたときに、落橋等致命的な状態になる危険性や修繕が著しく困難になる可能性が高い部位を、維持管理リスクが高い部位と定義する。ここでいう部位とは、部材の種別の違いに加えて、同じ部材でも、例えば主桁の端部と中間部では応力分布や劣化特性が異なることや、箱桁の内面と外面では構造の詳細も腐食環境も異なることも区別し、橋の各部を指し示すものとしている。また、ここでいう異常とは、損傷や劣化の総称を表すことにし、異常が外観に現れたものを変状と呼ぶことにする。

異常を見逃し・過小評価する可能性については、構造や部材の形状、変状の程度や異常の進行性の違いによって変わる。構造や部材の形状の観点からは、埋め込み部などの見えない部位・変状や、形状が複雑で死角が多い部位では、外観に生じるはずの変状を見逃す可能性が高くなる。また、変状の程度や異常の進行性の観点からは、例えば、鋼部材の亀裂などは一旦発生すると突発的に進行する可能性があるため、腐食とは進行の度合いが異なる評価とする必要がある。

異常を見逃し・過小評価したときに道路管理に与える影響の区分は、落橋等致命的な状態になる危険性だけでなく、修繕が大規模になる可能性や、通行者・第三者の事故が発生する可能性も考慮する必要がある。例えば、ある部位が機能を喪失したときに落橋や部材の機能の喪失に至る危険性を評価する方法として、図-1に示すようなFault Tree解析を用いる方法などが提案されている。Fault Tree解析では、頂上事象を例えば落橋や部材等の機能の喪失とし、各部位での損傷の生起が機能喪失に発展するメカニズムが階層的に表現される。部位間の機能の補完性や代替性を考慮して、ある部位が機能を喪失したときに頂上事象に直結するのか、そうでないのかの考察ができる。

以上から、表-2に示すような維持管理リスクマトリクスを用いて、状態の把握の慎重さを、部位と変状の種類の組み合わせ別に区分することを考えた。マトリクスの縦軸は異常を見逃したり、過小評価したりする可能性の大小であり、急激な進行の可能性も考慮している。横軸が異常を見逃したり、過小評価したときに道路管理に与える影響の区分である。そして、表内のグラデーション（濃淡）が維持管理リスクの大小である。濃い部分（左上部）は特に維持管理リスクが高く、薄くなるほど（右下部）リスクが低くなっていく。

診断に必要な情報を充足するという観点に立てば、部位と変状の種類の組み合わせ別に、リスクに応じて状態の把握の慎重度を区分することが合理的であろう。そこで、維持管理リスクが高くなるほど、外観の情報だけでなく複数の方法を組み合わせで当該部位・変状の情報を得ることが望ましいと考えられる。一方で、維持管理リスクが低い場合は、必ずしも近接しなくとも、ある程度明瞭な変状を外観上確認することも考えられる。

3. 斜張橋での試行

2.での提案方法を、気仙沼湾横断橋のうち、海上部を跨ぐ鋼3径間連続斜張橋部分の初回点検で試行した。図-2にFault Treeの解析結果を、表-3に維持管理リスクの整理結果を示す。また、リスクレ

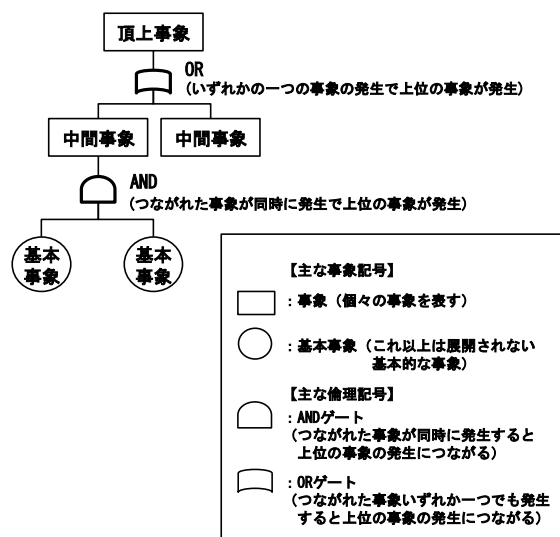
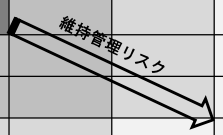


図-1 Fault Tree 解析

表-2 維持管理リスクマトリクス

変状の種類		部位・部材の重要度		落橋等の致命的な状態をもたらす可能性のある部位・部材	劣化が進むとLCCが増大したり、修繕が大規模になる可能性のある部位・部材	通行者・第三者の事故につながる可能性のある部位・部材	その他部位・部材
		見逃し易さ	急激な進行の可能性				
高い	有り						
	なし						
低い	有り						
	なし						



ベルを考慮して選定した点検方法を表-4 に示す。

このうちケーブル部材と桁・主塔を例に、点検方法の選定の考え方を示す。

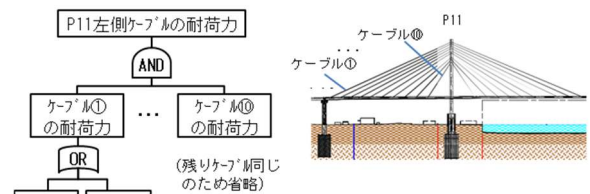
(1) ケーブル部材

本橋は上部構造を複数本のケーブルで支持しており、一本のケーブルが突発的に破断したとしても残りのケーブルが健全である場合は、急激に落橋等に至る可能性は低い。一方で、腐食等が進行した場合、複数のケーブルで交換が生じるなど大掛かりな修繕が必要になる可能性がある。

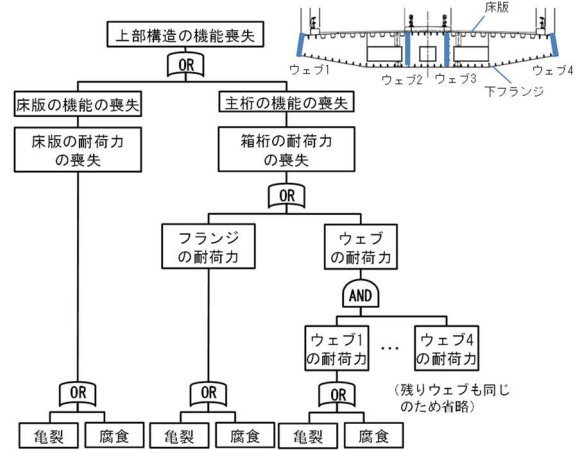
ケーブル部材は、ケーブルとそれを主塔や主桁に定着する定着構造からなる。特に定着部は異常の見逃しのリスクが高い部位である。なぜなら、ケーブルの振動などによる応力集中が生じやすいだけでなく、下側の定着部はケーブルを伝って水分が集中しやすい一方で、定着具に覆われ内部の状態を把握することが困難であるためである。そこで、近接目視を行うことにし、それだけでなく、一般部の被覆の損傷から被覆内部のケーブルを伝って定着部に滞水が生じたり、定着部のケーブルカバーの不具合などで水が浸入したことを想定して定着部内部での水みちを検討し、本橋のケーブル定着部ならではの点検の着目点を分析したうえで点検を行うことにした。一方で、定着部に水が浸入している痕跡がなく、被覆が破られていなければ、防食性能の劣化を疑うべき可能性は小さくなる。そこで、一般部についてはケーブル全長にわたってケーブル登攀ロボットを用い、むらなく被覆外観の画像情報を取得することにした。結果的に、近接するよりもきめ細かに記録できるだけでなく、高所まで配置されているケーブルの点検作業を省力化できることが期待できる。

(2) 桁・主塔

亀裂は一旦生じると急激に進行する可能性がある。桁外面は、溶接線はあるものの平面からなる構造であるが、桁内面については補剛材なども多く、細部の状態の把握が必要である。ケーブルで吊られていることもあり、急激な落橋に至る可能性は減じられているかもしれないが、例えば鋼床版は、亀裂が



(a) ケーブルの安全性喪失の FT



(b) 上部構造の安全性喪失の FT

AND : つながれた事象がいくつか複数同時に発生すると上位事象の発生につながる
OR : つながれた事象のいずれかが一つでも発生すると上位事象の発生につながる

図-2 Fault Tree 解析結果

表-3 維持管理リスクマトリクス整理結果

部位・部材の重要度		変状の種類	落橋等の致命的な状態をもたらす可能性がある部位・部材	劣化が進むとLCCが増大したり、修繕が大規模になる可能性がある部位・部材	通行者・第三者の事故につながる可能性がある部位・部材	その他部位・部材
見逃し易さ	急激な進行の可能性					
高い	有り					
	なし			ケーブルの腐食 主塔鉄筋コンクリート橋脚の塩害		
低い	有り		鋼製主塔の亀裂	鋼主桁の亀裂 鋼床板の亀裂	鋼床板の亀裂	
	なし		鋼製主塔の腐食	鋼主桁の腐食 鋼床板の腐食	鋼製主塔の防食機能の劣化	鋼製主桁の防食機能の劣化

表-4 各部材の点検方法

部材		点検方法
ケーブル	一般部	ケーブル登攀ロボットを用いた画像取得
	定着部	近接目視
主桁	内面	近接目視
	外面	UAVを用いた画像取得
主塔	内面	近接目視
	外面	壁面移動ロボットを用いた画像取得 橋面に設置した遠望カメラによる画像取得

進行すると通行者を事故に巻き込む懸念がある。したがって、細部構造部の亀裂が橋の機能や安全性、修繕に与える影響を考えると、維持管理リスクが比較的高いと言える。

腐食および防食機能の劣化については、新しい橋でもあり、水がかりが予測される桁端部や排水周りを除けば、全体として急激に進行する可能性が低い。すなわち、見逃しなどの情報の不足があったとしても、維持管理のリスクは低いと考えられる。以上を踏まえ、溶接線が多い桁内面や桁端部の外面や排水周りについては近接目視により確実に状態把握を行うことにした。一方で、桁外面については UAV を用いて画像情報を取得することにした。桁内面の情報と組み合わせて用いることで、桁としての診断に関わる維持管理リスクを管理することができるためである。これは、主塔も同様に考えることができる。

（３）経済性比較

すべての部材について近接して点検をした場合（基本ケースという）と、今回試行した近接での点検と支援機器での情報取得を併用した場合（試行ケースという）の費用を推計した結果を表-5 に示す。両ケースとも例えば主桁や主塔の内面、ケーブル定着部、支承周りは近接での点検が行われるが、ケーブル一般部の外面、主桁外面、主塔外面は点検方法が異なる。基本ケースの費用を 1.00 としたとき、試行では 0.51 となり、費用軽減の効果が認められた。支援技術の活用により点検費用は増加したものの、ケーブル、主桁、主塔、それぞれの点検のための通行規制にかかる期間が大幅に短縮でき、交通規制費が大幅に縮減できたことで、点検費用全体としてはメリットが大きかった。

表-5 経済性比較結果

		基本ケース		試行ケース	
ケーブル	①点検費	ロープ点検（14日間）	0.15	カメラ画像	0.18
	②交通規制費	全面通行止め	0.33	誘導員配置	0.05
主桁外側	①点検費	橋梁点検車（10日間）	0.15	カメラ画像	0.23
	②交通規制費	全面通行止め	0.23	なし	-
主塔外側	①点検費	ロープ点検（4日間）	0.04	カメラ画像	0.06
	②交通規制費	全面通行止め	0.09	なし	-
合計	①点検費	0.35		0.46	
	②交通規制費	0.65		0.05	
	①+②	1.00		0.51	

4. 結 論

定期点検の質の向上と省力化を目的として、維持管理リスクに応じて部材ごとの点検方法に求める信頼性を差別化し、点検方法を選定する方法を検討した結果、その方法の有効性を確認できた。質の向上も図ったうえでなお、費用面でも、各部に近接するための通行規制の時間が長くなる橋や、点検時間の制約が大きい橋では、支援機器等を用いるメリットがあることが分かった。

一方で、課題としては、事例の充実とルール的一般化が挙げられる。例えば、橋ごとの構造の違いを反映したうえで Fault Tree に分解するための方法論が確立されないと、点検方法の組み合わせの妥当性を客観的に検証することを妨げてしまう。点検支援技術の性能の評価についても、実際の実施結果を反映させ、標準化と充実を図る必要がある。

5. 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、ご指導いただきました白戸室長をはじめ、橋梁研究室並びに道路構造物研究部の皆様に深く感謝の意を表します。