

長大橋のリスク評価に基づく最適点検政策の検討

阪神高速道路(株)建設事業本部建設企画課	間嶋 信博
阪神高速道路(株)大阪管理部保全技術課	杉岡 弘一
阪神高速道路(株)建設事業本部建設技術課(堺設計担当)	小林 寛
阪神高速道路(株)建設事業本部建設技術課	金治 英貞

要 旨

一般に長大橋の維持管理、特に点検は、橋梁規模が大きく点検数量が多いことや、殆どが海上であり近接が困難であることなどから、実現可能で合理的な点検計画の策定が求められている。また、阪神高速道路ではいくつかの長大橋で点検用検査車が更新時期を迎えるが、更新には莫大な費用が必要となるため、今後の更新について判断が求められる。そこで、本研究では長大橋点検の合理化を目的として、検査車使用のケースおよび不使用のケースに着目し、長大橋のリスク評価に基づく最適な点検政策(ライフサイクルコストとリスクを同時に最小化する最適な点検手法と点検間隔の組み合わせ)の決定に関する一手法を提案する。さらに、重点的に点検すべき部材・箇所を明らかにする目的で長大橋3橋梁(ニールセンアーチ橋、斜張橋、ゲルバートラス橋)の詳細な全橋解析モデルを作成し、部材の腐食劣化が橋梁全体の性能に及ぼす影響を定量的に検討した。検討の結果、各長大橋において橋梁全体の性能に影響を及ぼす重要部位を示すことができた。また、この結果を用いることによって長大橋点検合理化計画立案への可能性を示せた。

キーワード: 長大橋, 点検, 腐食劣化, 全橋解析モデル

はじめに

阪神高速道路では湾岸線を中心に長大橋を有する。これらは路線別に5~8年/回の頻度で点検を行っている一般橋梁¹⁾と区別され、橋梁毎に点検計画を作成し点検を実施することとなっている。これら長大橋の維持管理、なかでも点検は対象橋梁の規模が大きく部材も多いことから点検箇所が多く煩雑となること、さらに海上橋梁が多く近接が容易でない箇所が多いことなどからコストが嵩み、当初計画通りに点検を実施できていないのが実情である。

また、いくつかの長大橋では点検用検査車が更新時期を迎えるが、更新には莫大な費用が必要となるため、今後の更新について判断が求められる。そこで、本研究では長大橋点検の合理化を目的として、検査車使用のケースおよび不使用のケースに着目し、長大橋のリスク評価に基づく最適点検

間隔決定手法の検討を行った。

さらに、長大橋は構造が複雑で冗長性が高いものもあるため、全ての部材を同じ重みで点検することは必ずしも合理的ではないと考えられる。そこで、長大橋3橋梁(例としてニールセンアーチ橋²⁾、斜張橋、ゲルバートラス橋)の腐食を対象として詳細な全橋解析モデルを作成し、重点的に点検すべき部材・箇所を明らかにする目的で、部材の腐食劣化が橋梁全体の性能に及ぼす影響を定量的に検討した。

1. 最適点検政策の検討

1-1 フォールト・ツリー分析の長大橋への適用

フォールト・ツリー分析は、システム構成部品の故障がシステム全体の故障に発展するメカニズムを階層的に表現し、下位レベルにある劣化事象の発生確率に基づいて、分析対象とするシステム

全体の機能障害リスクを評価するための手法である³⁾。長大橋を多数の部材と複雑な構造系を持つシステムと捉えると、システム構成部品の故障は部材レベルの劣化、システム全体の故障が長大橋全体の劣化に置き換えることにより本分析手法が適用できる。本研究では、最適点検政策の検討手法の開発を主目的とするため、斜張橋の腐食劣化を念頭に図-1に示す検討用のフォールト・ツリーを作成した。今後、実際のフォールト・ツリーの作成に当たっては橋梁の構造特性等に基づき、適切なANDゲート（すべての事象が発生した場合に生起する事象）とORゲート（どれか1つの事象が発生した場合に生起する事象）の組み合わせを十分に検討する必要がある。なお、本検討では地震や事故などの突発的事象によるリスクは考慮していない。

1-2 腐食ハザードモデルの構築とリスク評価結果

各構成部材の経年劣化は、点検データに基づき確率論的手法でモデル化した劣化ハザードモデル³⁾⁻⁵⁾を用いた。阪神高速では、目視点検において部材の健全度を5段階(OK,C,B,A,S)で評価しており、Sに近づくほど損傷度が高い¹⁾。今回の検討はサンプル数確保の観点からAとSを同一ランクにまとめた4段階評価とし、集計的推計法によってハザードモデルの推計を行った。

斜張橋の腐食を例として、表-1に過去4回の定期点検結果の集計、表-2にこの結果に基づき算出したマルコフ推移確率を示す。表-2に示すマルコフ推移確率は各損傷ランクの1年後の推移

確率を表しており、表より現在健全度 OK の部材が1年後もOKに留まる確率は0.951であることがわかる。これらを図-1に示したフォールト・ツリーに適用し、斜張橋全体の頂上事象の発生確率(=リスク)の経年変化を求めた。点検間隔を3,5,10年とした場合の結果を図-2に示す。各々の部材の損傷度がA,Sとなったときに故障と判定し、階層図に従って頂上事象の発生を判定するため、時間の経過と共に損傷度A,Sと判定される部材が増加し、頂上事象の発生確率が高まることがわかる。また、点検が実施されると同時に補修が実施されると仮定したため、発生確率は点検実施後に減少する結果となった。

表-1 腐食損傷集計(斜張橋)

点検	経年	損傷ランク			
		OK	C	B	A,S
供用開始時	0	186	0	0	0
第1回点検	5	139	39	8	0
第2回点検	11	127	32	27	0
第3回点検	21	105	32	47	1

表-2 腐食のマルコフ推移確率(斜張橋)

	OK	C	B	A,S
OK	0.951	0.046	0.002	0
C	0	0.907	0.093	0
B	0	0	0.995	0.005
A,S	0	0	0	1

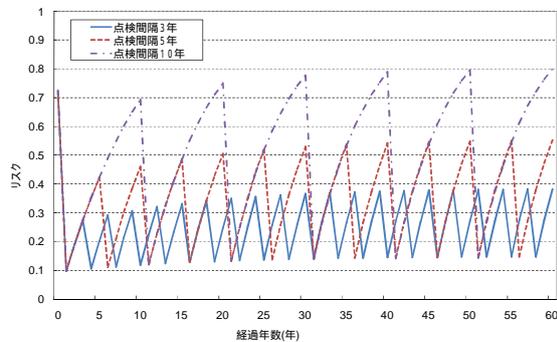


図-2 リスクの推移(斜張橋)

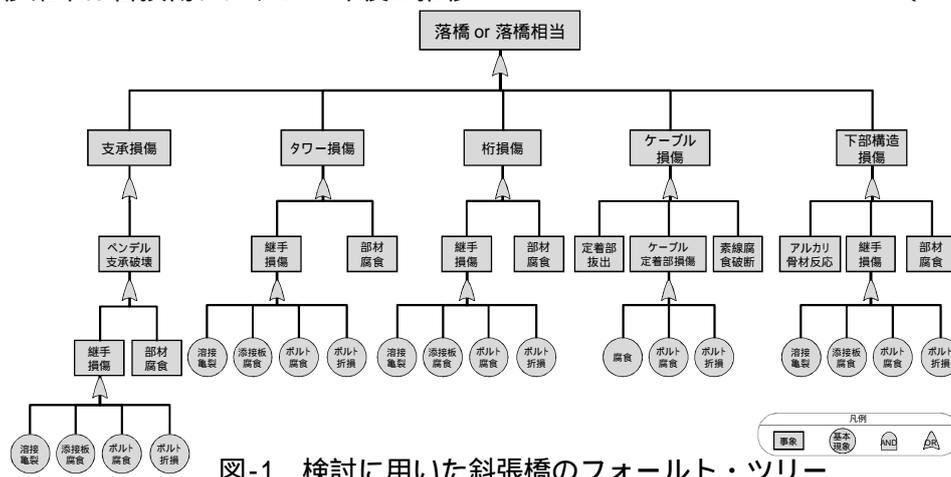


図-1 検討に用いた斜張橋のフォールト・ツリー

1-3 ライフサイクル費用評価

点検方法として検査車使用のケースおよび不使用のケースに着目し、ライフサイクル費用（以下「LCC」という）評価を行った。

検査車を使用するケースでは、点検時に足場を組む必要がないために1回の点検費用は検査車を使用しないケースと比較して小さくなる。しかしながら、検査車を使用するケースには検査車の維持管理のための費用が定期的に必要となり、老朽劣化のために30年に一度更新を行うと仮定した。更新には既設の検査車の撤去費用と新しい検査車の新設費用が必要となる。検査車を使用しないケースであっても、現状で検査車が設置されている場合には、検査車を撤去する費用が初期時点で必要となる。

また、検査車使用・不使用の両ケース共通で発生する費用としては、損傷部材に対する補修費用、7年に1回実施すると仮定した塗装費用がある。これらの費用に関する条件のもとで、本検討では各長大橋について下部工の減価償却期間となる60年間のLCCを算出した。

例として斜張橋（一面吊り）に対するLCCを、検査車を使用するケースと不使用のケースで比較した。点検間隔を3年とした時の60年間のそれぞれのLCCを図-3に示す。検査車を使用しないケースのLCCの方が小さくなっている。対象橋梁の場合、検査車が老朽化しているために、検査車使用のケースであれば現時点で直ちに更新を実施しなければならず、大きな初期投資が発生する。また、検査車不使用のケースにおいては、構造形式が一面吊りであり、橋面から橋梁下面を点検する橋梁点検車の使用に当たってケーブルは支障とならず、箱桁外面の点検においても足場の設置は必要ないことから、点検1回当たりのコストは低減される。これらの理由により、検査車不使用のケースの方がLCCの観点からは有利となった。

1-4 最適点検政策の検討

点検方法を検査車使用の場合および不使用の場合に着目し、点検間隔を3~20年で変化させて

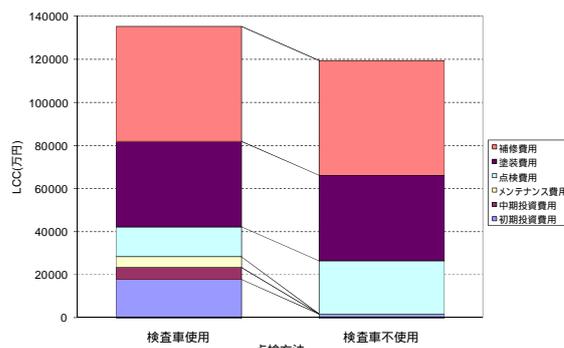


図-3 LCCの比較
(斜張橋(一面吊り)点検間隔3年)

LCC評価を行った。図-4に斜張橋（一面吊り）の60年間におけるLCC評価と前述の手法により求められた平均期待リスクを関連付けた結果を示す。

図中でLCCとリスクを同時に最小化するケースが最適な点検手法と点検間隔の組み合わせ（以下「点検政策」という）といえる。しかし一般的にLCCとリスクの間にはトレードオフの関係が成立するために、同時に両方を最小化する点検政策を見つけることは難しい。そこで今回は、現状の点検政策（点検間隔7年・検査車使用）を基準として相対比較により最適点検政策を検討する。図-4において点検間隔が3年あるいは5年で検査車不使用の2点については、LCC・リスク共に基準とした現状の点検政策より小さくなることがわかる。

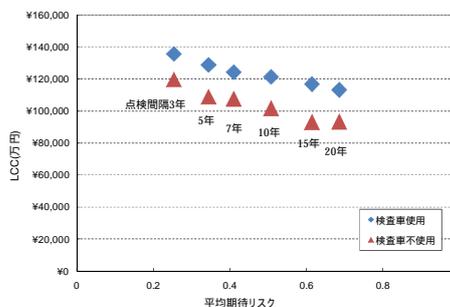


図-4 リスクとLCCの関係
(斜張橋(一面吊り))

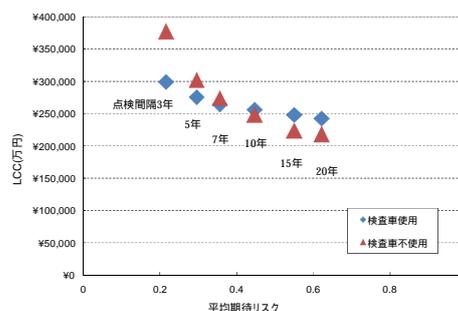


図-5 リスクとLCCの関係
(斜張橋(二面吊り))

次に斜張橋（二面吊り）を例とした検討結果を図-5に示す。構造形式が二面吊りであるために、橋面から橋梁下面を点検する橋梁点検車の使用に当たってはケーブルをかわす必要があり、非常に能率が悪く、箱桁外面の点検においては大部分で足場の設置が必要となる。そのため検査車を使用するメリットが大きく、検査車を使用の方がLCCは小さくなることがわかった。しかしながら、点検間隔が短い場合にはこの効果が大きく反映されるが、点検間隔が長くなるにつれ徐々にその効果が減少する。点検間隔7年でLCCはほぼ等しくなり、10年を超えると、逆に検査車を使用しないケースの方が費用面では有利となってくる。斜張橋（一面吊り）と同様に現行の点検政策（点検間隔7年、検査車使用）を基準とすると、今回の試算結果ではこれをLCCとリスクの両面で下回る点検政策は存在しないこととなった。

この様な手法を用い、図-1 に示したようなフォールト・ツリーの作り込みや点検データの蓄積による劣化ハザードモデルの精度向上を行うことにより、さらに最適な点検政策決定の根拠を与え得ると考えられる。

2 . 部材腐食解析

重点的に点検すべき部材・箇所を明らかにすること、および前述したフォールト・ツリーの精度向上を目的として、長大橋3橋を対象に部材解析を実施した。

2-1 解析モデルと荷重方法

対象とした橋梁はニールセンアーチ橋（神崎川橋梁：中央支間長150m）、斜張橋（天保山大橋：橋長640m(120m+350m+170m)）、ゲルバートラス橋（港大橋：橋長980m(235m+510m+235m)）の3橋梁で、図-6～8に各橋梁の全橋解析モデルを示す。ニールセンアーチ橋においてはアーチリブ・補剛桁・橋脚にファイバーモデル、鋼床版に非線形積層シェルモデル、斜張橋においては主塔・鋼製橋脚・ペンデル支承にファイバーモデル、多室箱桁

に非線形積層シェルモデル、ゲルバートラス橋においてはトラス部材（上下弦材・鉛直材・斜材）・鋼製橋脚・アイバー支承にファイバーモデル、鋼床版に非線形積層シェルモデルを用いて全橋をモデル化している。また、ケーブルはケーブル要素を用いている。これらのモデルを用いることにより、材料非線形性および幾何学的非線形性を同時に考慮した静的複合非線形解析を実施した。

なお、ファイバー要素を用いた場合には局部座屈を考慮できないため、表-3に示す各部材のモニタリング項目と設定値の圧縮側については実験値から与えられる座屈強度曲線 σ_c を用いて局部座屈を考慮した低減係数 γ を設定し、降伏応力度の低減を図っている。

また荷重方法については、荷重一定（設計荷重：D（死荷重）+L（活荷重））のもと、着目部材のオリジナル断面を経年劣化による腐食を想定し、母材厚を徐々に減少させ解析を行った。各部材において腐食パターンを想定し、設計荷重時において各部材が前述したモニタリング項目である許容値、降伏値、限界値または解析限界に達した時の部材腐食量を明らかにした。なお、今回の検討結果は活荷重を全面に荷重させたものである。また、本解析では地震や事故等の突発的な事象は考慮していない。

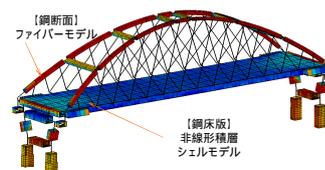


図-6 全橋解析モデル（ニールセンアーチ橋）

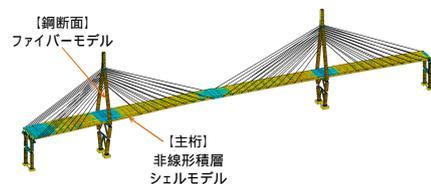


図-7 全橋解析モデル（斜張橋（二面吊り））

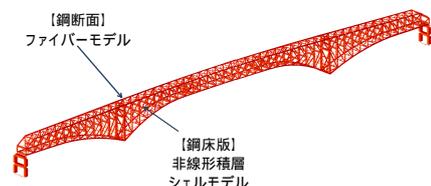


図-8 全橋解析モデル（ゲルバートラス橋）

表-3 各部材のモニタリング項目と設定値

着目部材	許容値	降伏点	限界値	解析限界 ×
主桁 (斜張橋)	a $= \sqrt{1.7}$ (安全率 1.7)	降伏応力 y		計算がストップした点
アーチリブ 補剛桁 主塔 ペンデル支承	a $= \sqrt{1.7}$ (引張)	降伏応力 y (引張)	限界ひずみ 50000 μ 8) (引張)	
弦材 鉛直材 斜材 アイバー支承	a $= \sqrt{1.7}$ (圧縮)	降伏応力 y (圧縮)	充填:11000 μ 8) 無充填: a 8) (圧縮)	
ケーブル	許容張力 P_a (安全率考慮)	引張強度 P_u		
鋼製橋脚	a $= \sqrt{1.7}$ (引張) a $= \sqrt{1.7}$ (圧縮)	降伏応力 y (引張) 降伏応力 y (圧縮)	中空断面部: 阪神高速基準 a (圧縮) 充填部: 道路橋示方書 a (圧縮)	
支承	移動可能量 a			

ミーゼス応力

2-2 解析パターンと解析結果

(1) ニールセンアーチ橋

解析はアーチリブ、補剛桁、ケーブル、鋼製橋脚においてそれぞれ 2~3 の腐食ケースを想定した。アーチリブは図-9 に示すようにウェブおよびフランジを起拱部、頂部、全体の 3 ケースで腐食させ、同様に補剛桁は図-10 に示すように下フランジを端部、中央部、全体の 3 ケース、ケーブルは図-11 に示すように索線を最も設計張力の高い端部付近の 1 組、2 組、全数の 3 ケース、鋼製橋脚は図-12 に示すようにウェブおよびフランジをコンクリート充填部直上、鋼断面全体の 2 ケースをそれぞれ腐食させ解析を実施した。

モニタリング項目の降伏値、限界値に達した時の着目部材の腐食量で示されるニールセンアーチ橋の解析結果を図-13 に示す。アーチリブ起拱部の板厚変化が橋梁全体に及ぼす影響が大きく、部材腐食 60%、つまりオリジナル断面の 40%となった時点で限界値に達している。アーチリブ以外の着目部材は、いずれの腐食パターンにおいても断面残存量がオリジナル断面の 30%まで減少しても限界値に達する部材はなかった。

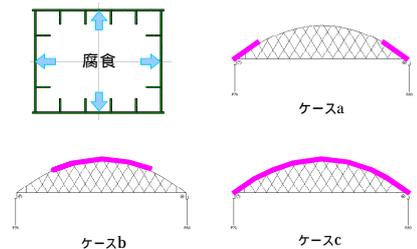


図-9 アーチリブの腐食パターン

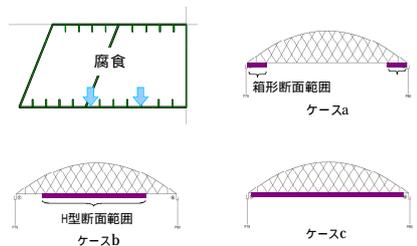


図-10 補剛桁の腐食パターン

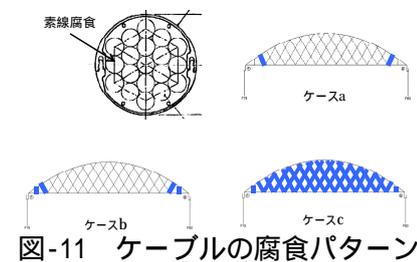


図-11 ケーブルの腐食パターン

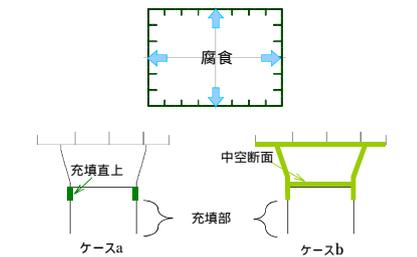


図-12 鋼製橋脚の腐食パターン

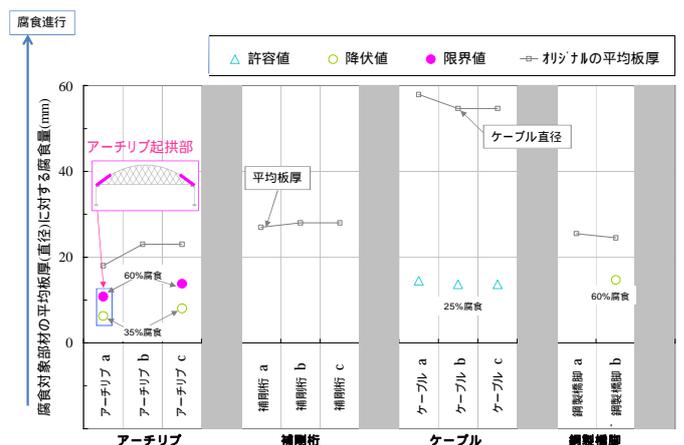


図-13 モニタリング項目に達した時の部材腐食量
(ニールセンアーチ橋：神崎川橋梁)

これらの結果より、通常の活荷重下においてアーチリブが橋梁全体の性能に及ぼす影響が大きく、特に起拱部の影響が支配的であると考えられる。

(2) 斜張橋

解析は主桁，主塔，ケーブル，鋼製橋脚においてそれぞれ2～8の腐食ケースを想定した．主桁は図-14に示すように各径間および全体の計4ケースで腐食させ，主塔は図-15に示すように上部・下部に分けその組み合わせの6ケース，ケーブルは図-16に示すように死荷重時の張力分担が同等のグループで分割し計8ケース，鋼製橋脚は図-17に示すように各橋脚の全断面損傷を想定し2ケース，ペンデル支承は図-18に示すように各橋脚上の支承損傷を想定した2ケースをそれぞれ腐食させ解析を実施した．

ニールセンアーチ橋と同様に，モニタリング項目に達した時の着目部材の腐食量で示される斜張橋の解析結果を図-19に示す．主桁の板厚変化が橋梁全体に及ぼす影響が大きく，2mmの腐食で許容値に達した．特に径間長の長い側径間（主桁c）の影響が大きい．また，終局限界状態と同等と考えられる解析限界についても，腐食量が比較的小さい段階で発生している．主塔は10mm腐食時，ケーブルは断面積が約50%となるまで許容値に達していない．また，ペンデル支承はモニタリング項目が発生しておらず，腐食による橋梁全体への影響は見られない．

これらの結果より，通常の活荷重下において主桁が橋梁全体の性能に及ぼす影響が大きく，重点的に維持管理すべき部位であることが分かる．

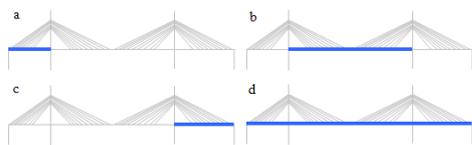


図-14 主桁の腐食パターン

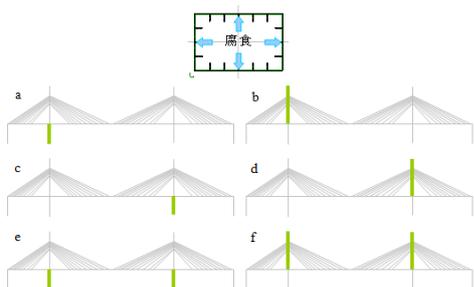


図-15 主塔の腐食パターン

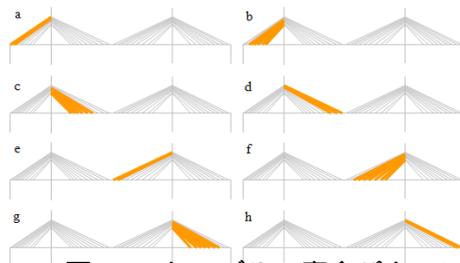


図-16 ケーブルの腐食パターン

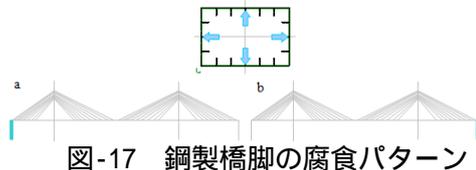


図-17 鋼製橋脚の腐食パターン

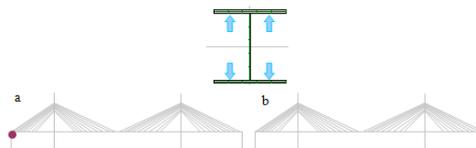


図-18 ペンデル支承の腐食パターン

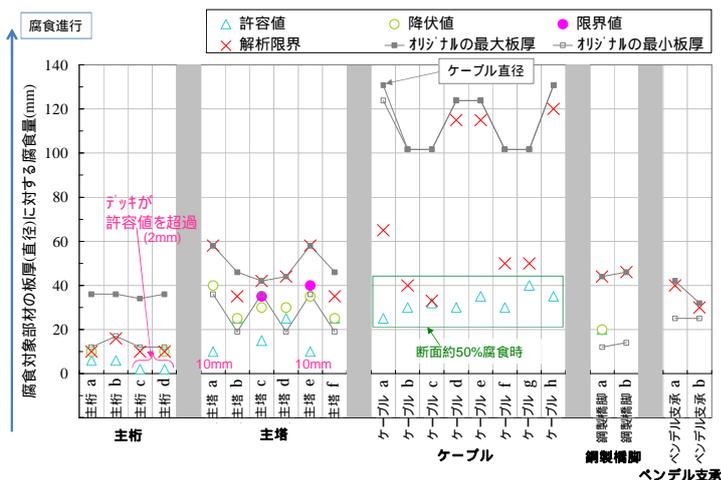


図-19 モニタリング項目に達した時の部材腐食量（斜張橋：天保山大橋）

(3) ゲルバートラス橋

解析は上弦材・下弦材で27ケース，斜材・鉛直材で28ケース，鋼製橋脚で2ケース，アイバー支承2ケースの腐食ケースを想定した．上弦材・下弦材および斜材・鉛直材は図-20，21に示すように各格点間の部材腐食を想定している．なお，橋梁構造が橋軸方向および橋軸直角方向において左右対称のため，腐食想定は橋梁全体の1/4としている．解析結果から腐食を想定していない側に影響はなく，対称性が強いことを確認している．鋼製橋脚は図-22に示すように各橋脚の全断面損傷を想定した2ケース，アイバー支承は図-

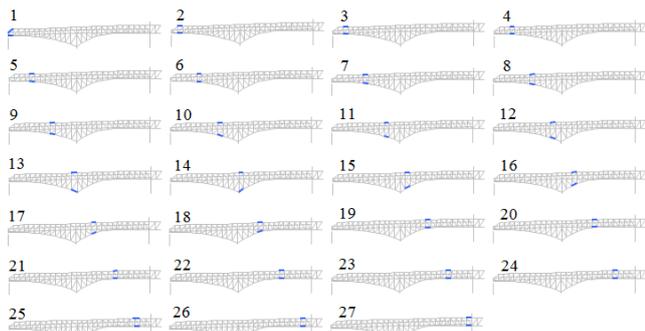


図-20 上弦材・下弦材の腐食パターン

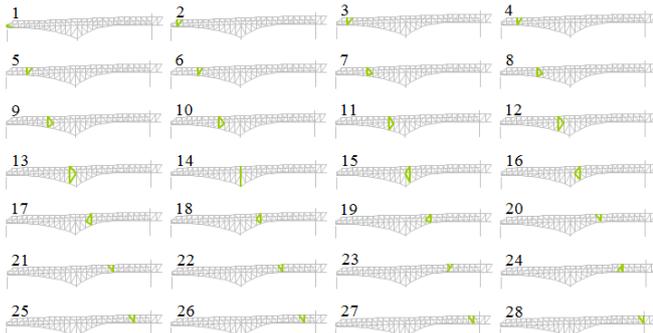


図-21 斜材・鉛直材の腐食パターン

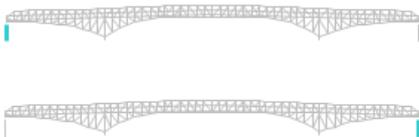


図-22 鋼製橋脚の腐食パターン

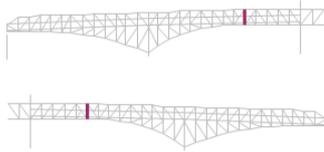


図-23 アイバー支承の腐食パターン

23に示すように各支承の損傷を想定した2ケースで解析を実施した。

ゲルバートラス橋の解析結果を図-24に示す。上弦材・下弦材および斜材・鉛直材のうち、側径間のL/2付近、中央径間のL/4付近の部材が3~4mmのわずかな部材腐食で許容値に達していることがわかる。また、アイバー支承は元々母材厚が大きいため許容値に達するまでの腐食量は大きい、降伏後終局状態である限界値に達するまでの余裕が小さいことが明らかとなった。

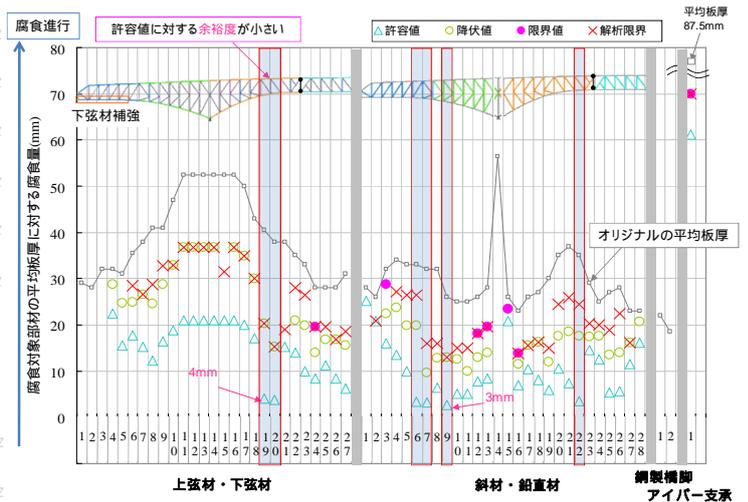


図-24 モニタリング項目に達した時の部材腐食量 (ゲルバートラス橋：港大橋)

2-3 解析結果総括

図-25に今回の解析から明らかになった各長大橋全体の性能に影響を及ぼす重要部位を示す。

また、本解析の鉛直荷重载荷において主塔・鋼製橋脚の損傷が橋梁全体へ及ぼす影響は小さいという結果になっている。しかし、主塔・鋼製橋脚は風荷重や地震荷重といった水平荷重が断面決定根拠となっているため、水平荷重を含めた検討が今後の課題としてあげられる。

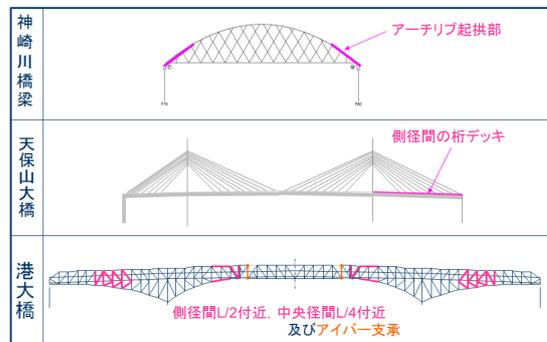


図-25 各橋梁の重要部位

3 . まとめ

長大橋のリスク評価に基づく最適な点検政策決定手法の検討を実施し、下記の知見を得た。

- ・フォルト・ツリー分析に基づく長大橋の経年的リスク評価手法を提案し、点検間隔と経年リスクの関係を定量化できることを示した。
- ・補修費用、検査設備の維持補修費用などの情報を用いてLCCと平均期待リスクの関係を点検間隔

ごとに定量化し、点検政策決定に関する一手法を提案できた。

また、重点的に点検すべき部材・箇所を明らかにすること、およびフォルト・ツリーの精度向上を目的として長大橋全橋解析モデルを作成し、部材の腐食劣化が橋梁全体の性能に及ぼす影響を定量的に検討した結果、各長大橋において橋梁全体の性能に影響を及ぼす重要部位が明らかになった。

- ・ニールセンアーチ橋（神崎川橋梁）：アーチリブ起拱部
- ・斜張橋（天保山大橋）：側径間の主桁
- ・ゲルバートラス橋（港大橋）：側径間L/2付近・中央径間L/4付近の上弦材・下弦材および斜材・鉛直材とアイバー支承

これらの結果より、部材ごとに点検・維持管理の濃淡をつけることも可能であり、長大橋点検合理化計画立案への可能性を示せた。

謝辞：本検討は「阪神高速道路の長大橋点検手法合理化検討会」で審議いただいた。本検討会の吉

川紀委員長（元大阪工業大学教授）、長井正嗣副委員長（長岡技術科学大学教授）、貝戸清之委員（大阪大学特任講師）には感謝の意を表します。

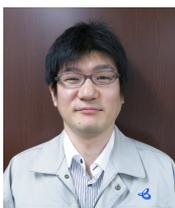
参考文献

- 1) 阪神高速道路株式会社：道路構造物の点検要領，2005.10.
- 2) 小林寛，間嶋信博，金治英貞：ニールセンアーチの全橋モデルによる部材腐食を想定した経年リスク解析，第64回年次学術講演会公演概要集，VI-378, pp.755-756, 2009.
- 3) Bedford, T. and Cooke, R. : Probabilistic Risk Analysis, Cambridge University Press, 2001, 金野秀敏訳：確率的リスク解析，基礎と方法，シュプリンガー・ジャパン，2006.
- 4) 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/VI-67, pp.111-124, 2005.
- 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推移確率の推定，土木学会論文集，No.801/I-73, pp69-82, 2005.
- 6) 青木一也，山本浩司，津田尚胤，小林潔司：多段階ワイル劣化ハザードモデル，土木学会論文集，No.798/VI-68, pp125-136, 2005.
- 7) 土木学会：座屈設計ガイドライン，2005.
- 8) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書-耐震設計編，丸善，2008.

RISK BASED INSPECTION STRATEGY CONSIDERING STRUCTURAL REDUNDANCY OF LONG SPAN BRIDGES

Generally, long-span bridges are large in scale and contain numerous inspection points. Most of them are also marine bridges with poor accessibility, which makes maintenance, especially inspection, more difficult. These require rational and feasible inspection programs to be established. To assist rationalization of long-span bridge inspection, this study proposes a risk assessment-based method to determine an optimum inspection program (an optimum combination of inspection method and intervals which minimizes life cycle cost and risk simultaneously), focusing on whether to use inspection gantries or not. The authors also created entire bridge analysis models to simulate corrosion and quantitatively determined risk-inducing conditions of structural members as well as impact of their corrosion on the performance of the entire bridge, so that members and locations to which higher inspection priority should be given were identified. These results must be useful in planning rational inspection programs for long-span bridges.

間嶋 信博



阪神高速道路株式会社
建設事業本部建設企画課
Nobuhiro MASHIMA

杉岡 弘一



阪神高速道路株式会社
大阪管理部保全技術課
Koichi SUGIOKA

小林 寛



阪神高速道路株式会社
建設事業本部建設技術課
Hiroshi KOBAYASHI

金治 英貞



阪神高速道路株式会社
建設事業本部建設技術課
Hidesada KANAJI