

# 電気防食に用いる陽極材の長寿命化とLCC

山本 誠<sup>1</sup>・佐野 清史<sup>2</sup>

<sup>1</sup>日本エルガード協会 技術委員 (〒102-8465東京都千代田区六番町6番28)

<sup>2</sup>日本エルガード協会 LCM委員長 (〒541-0043大阪市中央区高麗橋4-1-1 東洋建設大阪本店)

社会インフラの長寿命化計画等に基づくコンクリート構造物の有効な塩害劣化対策の一つに電気防食工法がある。電気防食工法は防食効果の信頼性が高く、その施工実績が増加しており、LCC的にも優れているが、近年の要求性能として、さらなる長寿命化を要望される場合が多々ある。本論文は、この要望に応えるため、電気防食に用いる陽極材の耐用年数を現状の40年から100年に延長する改良を実施し、この陽極材の耐用年数を2種類の促進試験において確認するとともに、改良した陽極材を用いた場合のLCCを試算した結果を紹介する。

キーワード 電気防食, 陽極材, 長寿命化, 促進試験, LCC

## 1. はじめに

現在、高度成長期に建設された多数の社会インフラは、供用開始から約50年が経過し、補修・補強の時期を迎えている。一方で、これら社会インフラの再構築は、社会情勢的にも困難な状況にあり、その対策として既存インフラ構造物の長寿命化が各方面で取り上げられ、長寿命化計画が構築されつつある。

社会インフラを構成する上で重要となるコンクリート構造物では、経年による変状に加え、中性化、塩害、ASR、凍害に代表される耐久性に影響を及ぼす劣化現象も十数年前から認められており、社会資本の維持管理上、より厳しい状況にある。中でも中性化や塩害による劣化は、コンクリート内部鉄筋の腐食に起因し、コンクリートかぶり部がはく離、はく落する劣化現象であり、構造物の耐久性に大きな影響を及ぼす。これら劣化対策では、表面ライニング工法に代表される外部からの腐食因子を遮断することで内部鉄筋の腐食を抑制する間接的な補修工法が従来から用いられてきた。しかし、塩害の厳しい環境では、補修後に既に蓄積された塩化物イオンに起因した再劣化も認められている。

近年では、その対策としてコンクリート内部鉄筋の腐食反応そのものを電気化学的に直接停止させる電気防食工法が注目を集め、その実績も増加している。

電気防食工法では、防食電流を供給するためにコンクリート表面へ陽極材が設置される。LCCの算定では、この陽極材の耐用年数が用いられることが一般的であり、NACE<sup>®</sup>による促進耐久性試験（以下、NACE法と称する）結果に基づき40年と設定されていることが多い。ま

た、NACE法の試験期間は、180日と長時間を要する。したがって、電気防食工法における長寿命化に向けた取り組みの一つは、長期耐久性に富む陽極材の開発と短時間での促進試験方法にある。

本論文では、この陽極材の長寿命化に取り組み、製作した長寿命型陽極材の促進耐久性試験について紹介するとともに、この陽極材を用いた場合のLCCを検討した結果を紹介する。

## 2. 長寿命型陽極材の製作と耐久性促進試験

### (1) 長寿命型陽極材の製作

コンクリート構造物の電気防食工法の陽極材には、その基材として耐久性に富むチタンが用いられることが一般的である。チタンは、その表面が酸化チタンとなっており、非常に安定しているため、その表面での電気のやり取りができない。そこで、基材であるチタンに白金系貴金属を焼き付けコーティングすることにより、電気防食で供給される防食電流をコンクリート内部へ放出しやすくすることで、電気防食用の陽極材とする。この白金系貴金属は、通電により徐々に消耗されるため、これが陽極材の寿命となる。つまり、陽極材の作製では、白金系貴金属が基材であるチタン表面にムラなく焼き付けコーティングされる必要がある。焼き付けコーティングの工程では、白金系貴金属が混合された溶液中に、幅が約12mm、長さが76mの細かいメッシュ状になったロール状のチタンを浸し、その後、オープンで熱を加える。したがって、チタンを白金系貴金属溶液に浸す際に、隅々まで溶液がいきわたることが重要であり、この工程を見直

すことにより、より安定した焼き付けを行うことが可能となった。

(2) 促進試験による長期耐久性試験

a) NACE法の概要

NACE法<sup>1)</sup>とは、米国腐食防食協会 (NACE) で規格化される電気防食用陽極材の耐久性試験方法である。NACE法では、30 g/L塩化ナトリウム溶液、40 g/L水酸化ナトリウム溶液、珪砂に水酸化カリウム、水酸化カルシウム、水酸化ナトリウム、塩化カリウムからなる模擬細孔溶液の3種類を電解液として用いる。通電では、図-1に示すように電気防食用陽極と試験用陰極が直列になるように直流電源装置に設置し、積算電流密度が38,500 A-h/m<sup>2</sup>となるように試験片陽極に通電電流量17.8 mAを180日間供給し、通電時の極間電圧、陽極電位を測定する。この積算電流密度は、陽極表面積当たり110 mA/m<sup>2</sup>の電流を40年間流し続けることと一致するため、本規格試験を満足する場合、40年間以上の寿命があると判断される。なお、判定基準は「初期陽極電位からの上昇量が4.0 V以内であること」とされる。この場合の積算電流密度は38,500 A-h/m<sup>2</sup>となる。本試験では、100年相当の積算電流密度96,250 A-h/m<sup>2</sup>となるように通電期間を450日間まで延長することで評価した。

b) 日本エルガード協会法

日本エルガード協会法<sup>2)</sup>とは、NACE法で用いられる通電電流密度を大幅に大きくし、通電期間を大幅に短縮させることを目的として、電解液として150 g/Lの希硫酸を用いる促進方法である。具体的には、通電電流密度1453 A/m<sup>2</sup>、通電期間が26.5時間であり、積算電流密度は38,500 A-h/m<sup>2</sup>である。図-2および図-3には、それぞれ試験装置と試験用電極の概要を示す。なお、判定基準はNACE法と同様である。そこで、本試験では、100年相当の積算電流密度96,250 A-h/m<sup>2</sup>となるように通電期間を66.3時間まで延長することで評価した。

(3) 促進試験による長期耐久性試験結果

図-4には、NACE法における通電期間中の陽極電位の経時変化を示す。なお、試験では、各電解液ごとに2試料実施しており、試験結果は、その平均とした。この結果から、いずれの電解溶液中でも陽極電位は、通電初期の電位と比較して大きな変化はなく、通電期間450日まで安定した電位（極間電圧）を示した。したがって、NACE法による耐久性評価として、100年間以上の通電能力を備えていることが確認された。

図-5には、日本エルガード協会法における通電期間中の極間電圧の経時変化を示す。この結果からも、先に示したNACE法と同様に、通電期間66.3時間での極間電圧が安定しており、陽極電位の急激な上昇は確認されなかった。したがって、本促進試験法でも100年間以上の通電能力を有する耐久性があるものと評価できる。

これら結果から、本試験では、電気防食用陽極材の促進耐久性試験として2種類の促進試験法を用いて評価し、いずれの試験でも、陽極の耐久性として100年以上を有するものと評価できた。

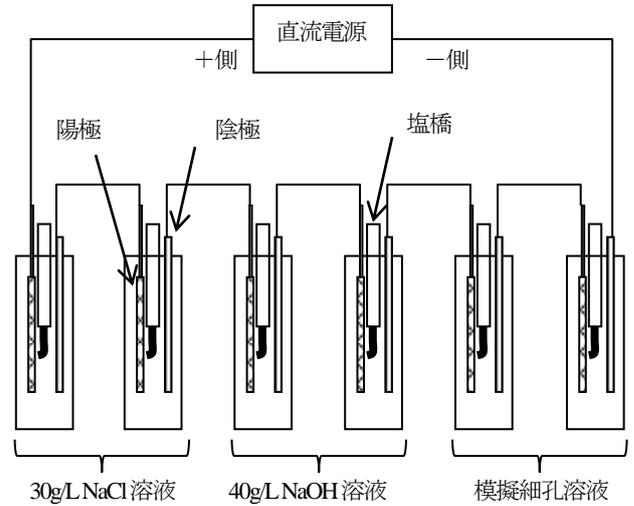


図-1 NACE法の試験装置概要

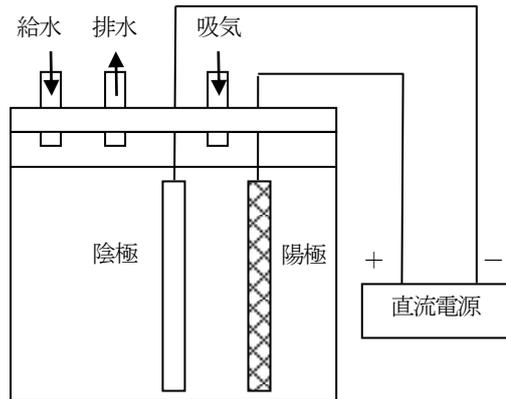


図-2 日本エルガード協会法の試験装置概要

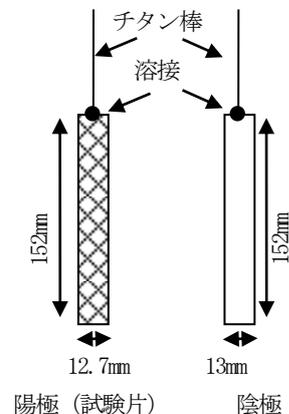


図-3 試験用電極の概要  
(日本エルガード協会法)

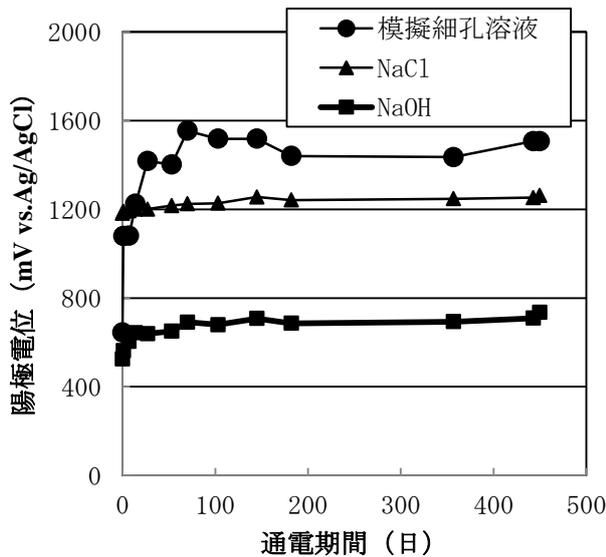


図-4 陽極電位の経時変化 (NACE法)

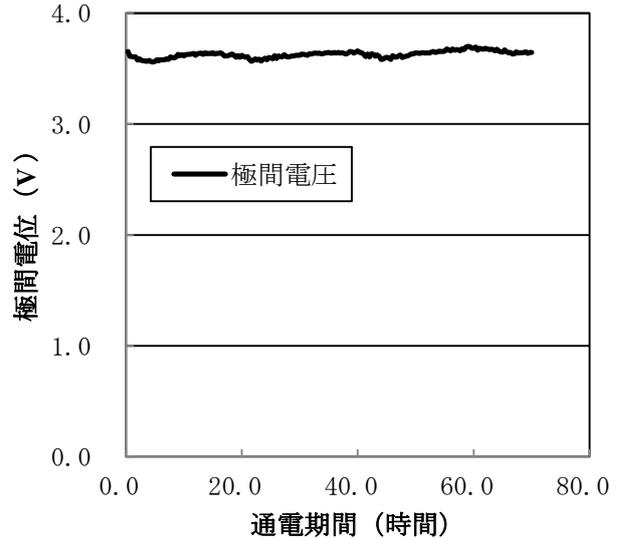


図-5 極間電圧の経時変化  
(日本エルガード協会法)

### 3. 長寿命型陽極材を用いた場合のLCCの試算

上記によって製作し、その長期耐久性が確認された長寿命型陽極材を用いた場合のLCCを試算した結果について以下に紹介する。

#### (1) LCC算定ツールと算定の基本条件

LCCの算定に用いるツール(ソフト)は、日本エルガード協会のLCM特別委員会において作成したものである。このツールは、塩害による劣化過程期間の予測を拡散則および腐食速度の予測式<sup>3)</sup>に基づいて試算するとともに、試算結果から得られる各劣化過程ごとのLCCの試算が可能である。

長寿命型陽極材を用いるLCCの試算においては、陽極材の耐用年数に100年を想定しているため、PC構造物に対して予防保全的に対策補修工事を実施する進展期の最終時点、およびRC構造物に対する加速期の中間時点で対策を実施することとして試算した。進展期をPC構造物、加速期をRC構造物としたのは、PC構造物におけるはつりによるプレストレスの解放を考慮したためである。

図-6および図-7にLCC算定ツールを用いて試算したPCおよびRC構造物の劣化進行過程と構造条件を示す。この劣化進行予測過程に基づき、PC構造物では竣工後20.9年、RC構造物は18.1年後に対策を実施することとした。

LCC試算比較の算定期間は、対策工事実施後100年間とし、試算比較工法は、電気防食を陽極耐用年数2水準、即ち、①100年対応長寿命型陽極と②従来の40年対応陽極、③表面被覆工法(進展期補修のPC構造物)、④断面修復工法(加速期補修のRC構造物)、⑤脱塩工法+表面被覆工法とした。また、これらの各補修工法の算定条件として、以下の項目等を考慮することとした。

①および②の電気防食工法では、電気代および防食効果確認試験費や近年義務付けられた定期的な点検等の維持管理費、陽極システムや配線・配管および電源装置等の機器の更新費並びに補修時における浮き、はく落部の小断面修復の費用などである。

③の表面被覆においては、定期点検の費用を含み、表面被覆材の耐用年数を15年として、再補修を繰り返すことにした。但し、補修後供用期間100年を考慮した場合の表面被覆が繰り返しのみでの運用には疑問も残る。

④の断面修復では、③と同様に定期点検の費用を含み、補修後の耐用年数を75年として、補修時には、発錆限界塩化物イオンを含むコンクリートを深さ8cmで全てはつり取り、断面修復を実施し、③の表面被覆を併用することとした。

⑤の脱塩工法+表面被覆では、③、④と同様に定期点検の費用を含み、補修時における浮き、はく落部の小断面修復を実施し、劣化期での適用における脱塩性能のパラッキを考慮して劣化期のみ75年後に再度脱塩工法を適用することとした。表面被覆の耐用年数は③と同様である。

これらのLCC試算条件および試算に用いる費用の一覧を表-1に示す。なお、試算に用いた費用は、文献<sup>4) 5)</sup>に準じ、実状に応じた変更と記載がないものについては、社会的常識の範疇での仮定とした。

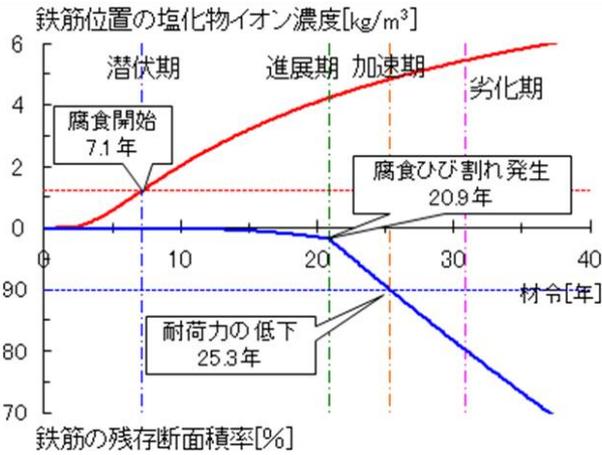


図-6 LCCの算定に用いたPC構造物の劣化進行予測過程

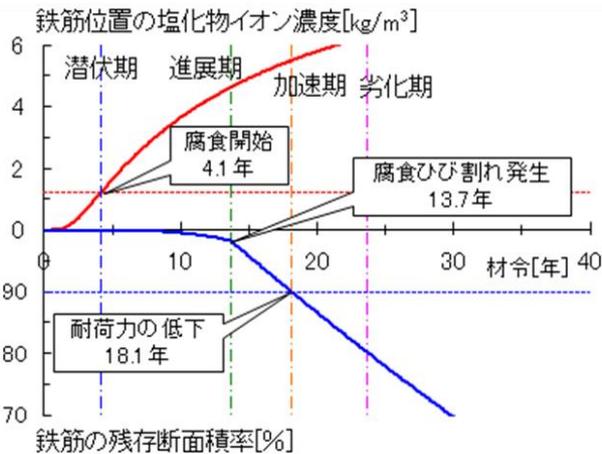


図-7 LCCの算定に用いたPC構造物の劣化進行予測過程

表-1 LCCの試算に用いた条件と費用<sup>3) 4)</sup>

	耐用年数 適用頻度	対策工事費 (¥/m <sup>2</sup> )	適用比率 (%)	
			進展期	劣化期
①電気防食	100	89,000	100	100
②電気防食	40	89,000	100	100
③表面被覆	15	17,600	100	—
④断面修復	75	150,000	—	100
⑤脱塩工法	75	80,000	100	100
他工事費				
仮設費	都度	11,000	100	100
⑤仮設費	都度	22,000	100	100
小断面修復	—	77,600	0	20
①②運転費				
電気代	回/年	30	100	100
効果確認費	回/年	800	100	100
①②補修費				
配線・配管	回/20年	8,000	100	100
電源装置	回/20年	11,000	100	100
点検診断費				
一般定期	回/5年	6,037	100	100
詳細定期	回/15年	12,770	100	100

(2) LCC算定結果とその評価

上記に基づき、進展期にPC構造物に対する対策を実施した場合のLCCの試算結果を図-8に示す。同様に劣化期のRC構造物に適用した場合を図-9に示す。また、それぞれの試算結果から対策工事実施後、40年、75年、100年間の対策工事費および点検費用の総額の対策工法別の比較を図-10および図-11に示す。

これらの試算結果によれば、PC構造物の進展期における対策では、全期間を通して表面被覆工法が最もLCCに優れている。また、対策後40年後では、電気防食工法の方が脱塩工法よりもLCCとしては優れているが、40年対応型陽極の電気防食は、この時点での陽極システムの交換費用がかさむため、その後のLCCでは、40年対応型の電気防食は、脱塩工法よりもLCC的に劣る結果になっている。一方、100年対応型の陽極での電気防食は、全期間を通じて脱塩工法よりもLCCに優れていることがわかる。また、これらの対策方法のLCCとしてのコスト比率の差は、40年対応型の電気防食を除き小さくなる傾向にあると判断できる。なお、本評価には防食効果の確実性等の工法的な評価が含まれていない。例えば、本LCCの試算のような発錆限界以上の塩化物イオンを含む構造物に対して表面被覆工法を長期的に適用することは、必ずしも適切な選択とはいえず、その意味で適正な比較対象となっていない一面がある点を考慮する必要がある。

一方、加速期におけるRC構造物への対策の実施において、対策実施後40年では①、②電気防食<⑤脱塩工法<④断面修復の順となっているが、一方で対策実施後75年では、①100年対応型電気防食<⑤脱塩工法<④断面修復<40年対応型電気防食となっている。これは、進展期における対策の場合と同様に対策実施後40年の時点での陽極システムの交換費用が影響しているためであり、同様な影響は、断面修復や脱塩工法の耐用年数を75年としたことで、対策後100年では、①100年対応型電気防食<⑤脱塩工法<②40年対応型電気防食<④断面修復となり、対策工法の耐用年数がLCCの試算に非常に大きな影響を及ぼすことが明らかである。なお、断面修復および脱塩工法の耐用年数を100年とした場合には、対策実施後75年の場合と同様なLCC試算結果の順序となる。

このように、塩害における対策工法のLCCの試算においては、適用される工法の耐用年数がLCCに対して大きな影響を及ぼすことが明らかであり、現在社会的に求められている社会インフラの更なる長寿命化に対して、防食効果の確実性に優れている電気防食工法の100年長期対応型が可能になることは、今後のインフラの長寿命化に応える有効な手段になると考えられる。

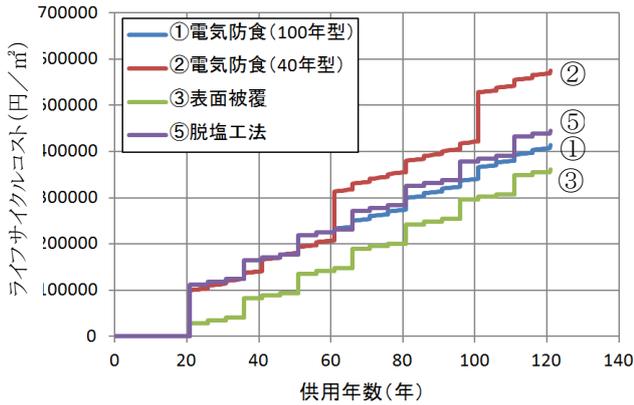


図-8 進展期 (PC構造物) におけるLCC試算結果

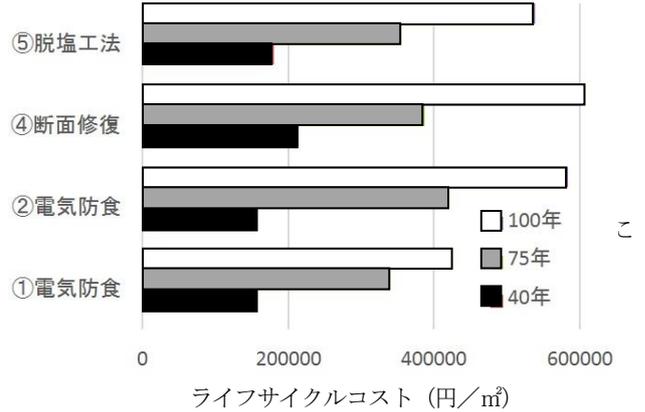


図-11 加速期における対策工法のLCCの比較

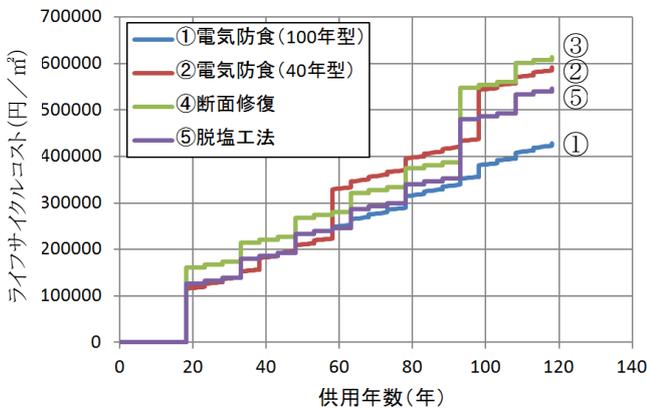


図-9 加速期 (RC構造物) におけるLCC試算結果

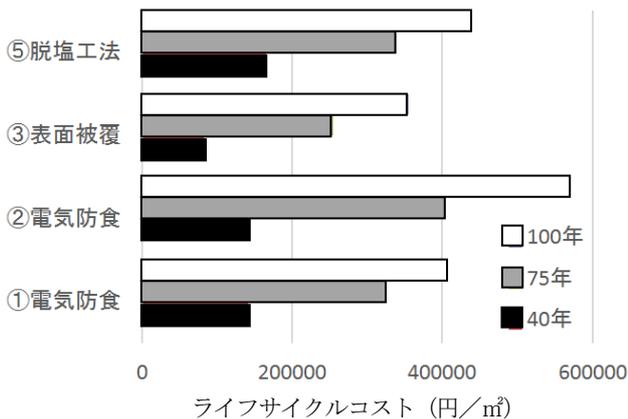


図-10 進展期における対策工法のLCCの比較

#### 4. まとめ

電気防食工法の長寿命化に因るため、電気防食用陽極材の焼き付け工程を見直すことにより、陽極寿命が100年と設定可能な陽極材を作製し、その耐久性試験を2種類の促進耐久性試験で実施した。その結果、いずれの試験方法においても陽極寿命として100年以上を満足する評価が得られた。この結果と従来の陽極寿命40年耐用における電気防食工法およびその他補修工法によりLCCの試算を行った結果、電気防食工法におけるLCCでは、使用される陽極材の寿命により、LCC試算結果に与える影響が大きいことが確認されるとともに、100年耐用型電気防食用陽極材の有用性が確認された。

#### 参考文献

- 1) NACE : NACE standard TM0294-94, Item No.21225, March 1994
- 2) 藤川孝文, 川俣孝治, 山本誠 : 電気防食用陽極材の耐久性試験に関する検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会, 57 巻, pp.1153-1154, 2002 年
- 3) 中川将秀, 壹岐直之, 羽瀨 貴士, 峰松 敏和, 福手 勤 ; 港湾コンクリート構造物を対象とした各種補修工法と LCC 試算. 日本コンクリート工学協会「コンクリート構造物のアセットマネジメント」に関するシンポジウム, 2006, 12
- 4) 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘 : 栈橋のライフサイクルシステムの構築に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, 第 48 巻 第 2 号, 2009.6
- 5) 野上周嗣, 加藤絵万, 川端雄一郎, 佐藤徹 : 栈橋上部工の維持管理シナリオに関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1296, 2014.12