

港大橋橋梁点検・補修台車の設計・施工

～Dr. RING 都市高速道路の長寿命化へ～

阪神高速道路(株)大阪管理局保全部施設保全課 黒寄 寿行
阪神高速道路(株)大阪管理局保全部施設工事課 下方 正康
阪神高速道路(株)大阪管理局保全部保全設計課 杉岡 弘一

要 旨

港大橋の損傷発生は経年的な増加が顕著であるにもかかわらず、本橋梁が複数の構成部材・接合部からなるトラス構造であり海上高所に位置することから、点検・補修用の足場設置は容易ではない。このような状況から、都市高速道路の長寿命化を担う橋梁本体の効果的・効率的な維持管理を確立する 1 つの取り組みとして誕生した港大橋専用の橋梁点検・補修台車が Dr. RING (Repair & Inspection equipment for Nanko Gate) である。Dr. RING の点検・補修範囲は、旧台車と比較すると大幅に拡大し、特に、下路下面においては、下面足場に設置された昇降移動足場を用いることにより、全範囲で点検・補修が可能となった。

本稿は、Dr. RING の設計・製作・施工・維持管理から、特に安全性に関わる重要なポイントについて紹介する。
キーワード: Dr. RING, 港大橋, トラス構造, 橋梁点検・補修台車, 長寿命化

はじめに

港大橋橋梁は、構造の特徴が複数の構成部材・接合部からなるトラス構造であり、点検・補修するために必要な足場の設置が海上高所に位置するため非常に困難である。本橋梁の損傷状況は、阪神高速道路における特殊長大橋梁の中で著しく、経年的な増加が顕著であり過去に断面欠損に至る損傷もあった。国内における社会資本の老朽化対策は、笹子トンネルの天井板崩落事故を受け平成 26 年 7 月国土交通省より 5 年に 1 回の頻度で構造物の近接目視点検が義務付けられた。このような状況から、都市高速道路の長寿命化を担う橋梁

本体の効果的・効率的な維持管理を確立する 1 つの取り組みとして誕生した港大橋橋梁点検・補修台車が Dr. RING である。

本稿で行う報告は、以下の通りである。

- Dr. RING の構成
- 設計：上部台車構造に着目した FEM 解析及び地震動の時刻歴応答解析の結果
- 製作：溶接部の品質管理
- 施工：一括架設・撤去
- 点検：今後のメンテナンス計画

1. Dr. RING の構成

Dr. RING の構成・動きを明確にするため、構成イメージを図-1 に示す。

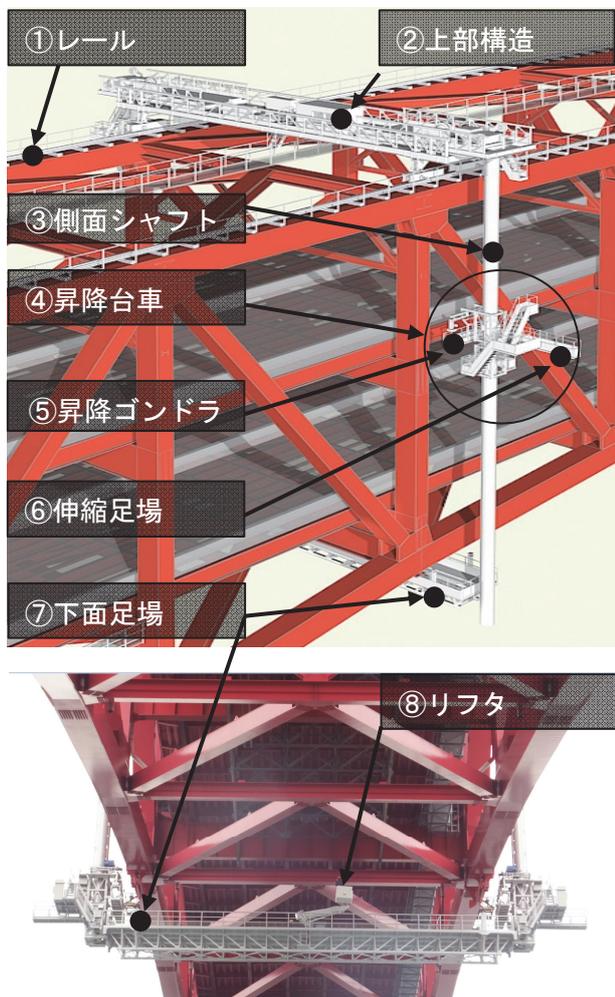


図-1 Dr. RING 上部台車の構成

上部台車は、主構上面の両側に敷設されたレール (①) を走行する上部構造 (②), その上部構造の両端部に接合され鉛直下方に配置される2本の側面シャフト (③) で全体をコの字型に形成し、その側面シャフトに沿って昇降する昇降台車 (④) 及び昇降台車に付帯する昇降ゴンドラ (⑤) と橋軸直角方向にスライドする伸縮足場 (⑥) により構成される。これにより主構側面の保守作業が可能となる。下面足場 (⑦) は、中央径間及び両側径間の主構高が低い各区間の橋梁下面に係留され、上部台車の両側の昇降台車を側面シャフト下端近くまで下降させ、係留された下面足場と上部台車を連結することにより橋梁断面を

包み込む口の字型の移動足場が構成される。これにより橋梁下面部分も含めた橋梁の外表面全体の点検等が可能となる。

点検範囲は、旧台車と比較すると大幅に向上し、大きな違いは、下面足場等に設置されたリフト (⑧) によって下路下面の点検・補修する範囲が100%になったことである。

2. 上部台車構造の FEM 解析検討

本章では、上部台車構造の応力・反力・変形状態について FEM 解析を行い応力及び変形状態について報告する。FEM 解析実施フローを図-2 に示す。

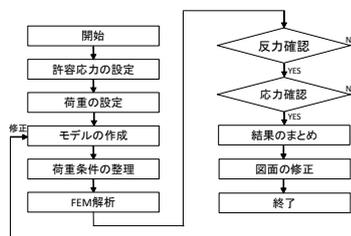


図-2 FEM 解析実施フロー

2-1 解析条件の設定

FEM 解析実施フローの通り、条件設定を行う。

構造条件 2 ケースと荷重条件 3 ケースに分け合計 6 ケースを表-1 に示す。構造条件は、コの字型 (以下、ロ型) 及びコの字型 (以下、コ型) とし、荷重条件は、ゴンドラ構造規格¹⁾ により I

表-1 荷重条件の整理

荷重条件 \ 構造条件		a	b
		下面足場の連結有 (ロ型)	下面足場の連結無 (コ型)
I	自重+積載荷重+水平動荷重	a-I	b-I
II	I+風荷重[橋軸方向]	a-II	b-II
III	I+風荷重[橋軸直角方向]	a-III	b-III

~IIIとした。

構造モデルは、部材特性を把握するため3次元梁要素・板要素及び質量要素から成り、各部材を着色している。構造モデルを図-3 に示す。

図中のスライドフレームは、橋軸直角方向に伸縮する動きを持ち下面足場連結有では縮んでいる状態であり、下面足場連結無 (以下、コ型) では応力上不利な最大張り出しとしている。

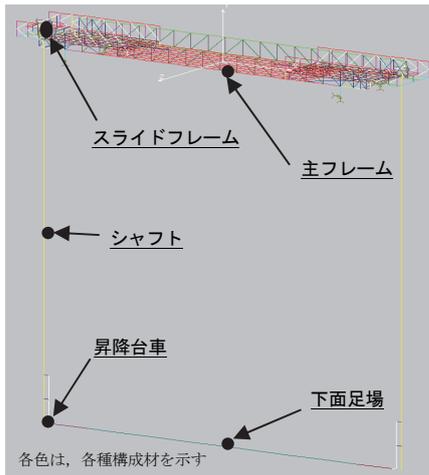


図-3 構造モデル

2-2 応力及び変形状態の解析結果

6 ケースの解析結果の中で、最大応力の影響について述べる (図-4).

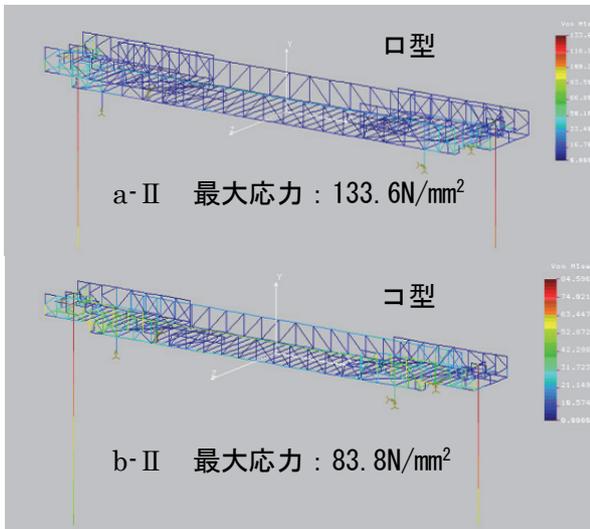


図-4 最大応力状態

構造条件 a および b の最大応力は、荷重条件 II である。その中で、口型が最大応力を示している。これは、下面足場の連結による受風面積が大きくなるためである。

表-2 に各ケースの最大許容応力結果を示す。

表-2 主要部材の荷重ケース最大応力結果

構造モデル 荷重の組合せ	下面足場有			下面足場無		
	I	II	III	I	II	III
シャフト 【SUS304】	最大応力	79.7	133.6	108.9	55.3	83.8
	降伏点			205		
	許容応力			121		
判定			○			
スライド フレーム下弦材 【A508P-O】	最大応力	7.1	10.4	10.8	51.9	63
	降伏点			99.9		
	許容応力			58.8		
判定			○			
スライドフレーム 支柱 【A5083S-H112】	最大応力	45.4	65.1	51.5	49.3	60.4
	降伏点			108.3		99.9
	許容応力			63.7		58.8
判定			○			

各主要構造材の許容応力は、降伏点から安全率 1.7 を除いた値である。各ケースにおいて、最大応力は許容応力内である。ただし、許容応力を超えている 3 カ所 (赤枠) は、ゴンドラ構造規格¹⁾ よりに許容応力を 15% 割り増した値となっている。

次に、風荷重の影響を受けた変形状態を確認し、橋梁とシャフトの遊間を確認する (図-5)。

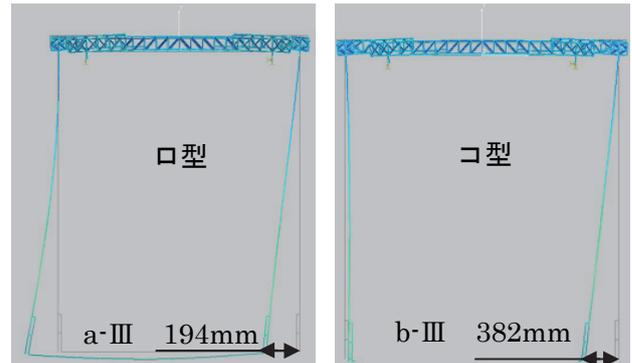


図-5 シャフトの最大変形状態

構造条件 a および b の最大変形量となるのは、荷重条件 III である。その中で、b 型が、最大変形量を示している。これは、シャフト下端の固定部がなく不安定な形状になっているためである。橋軸直角方向の風荷重を受けた最大変形量 382mm は、垂直状態のシャフト時に橋梁本体から 1,600mm 離れているため橋梁と接触しないことがわかる。

3. 地震動の時刻歴応答解析検討

地震時の設計条件として、内陸直下型及び海溝型のレベル 2 地震動²⁾ (以後、大規模地震動という) に対して「橋梁本体に接触せず、またはその構造が崩壊しない」構造でなければならないと設定した。具体的には、以下の状態を満足する必要がある。

状態 1: 係留状態で上部台車側面シャフトが橋梁本体に接触しないこと。

状態 2: 係留以外の状態で上部台車本体及び側面シャフトが崩壊せず、落下しないこと。

本章は、大規模地震動を受けた場合に上記 2 つ

の状態を満足することを時刻歴応答解析により挙動を把握して確認する。検討フローを図-6に示す。

また、上部台車が橋梁本体に衝突した場合の橋梁本体への影響についても確認する。

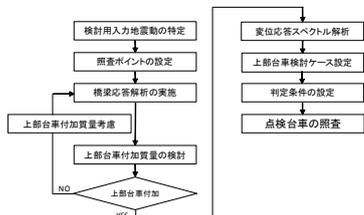


図-6 検討フロー

3-1 条件設定

検討フローの通り、条件設定を行う。

a) 点検台車の支持点である上弦材格点が全55点あるが、橋梁本体の対象性や台車の運用等を考慮して検討するポイントを8点設定した(図-7)。

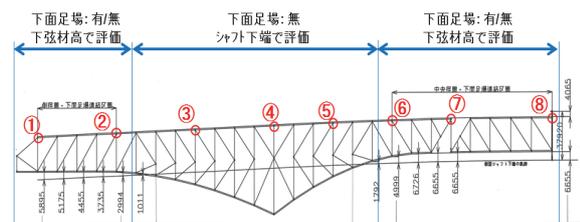


図-7 解析ポイント

b) 点検台車の付加質量の有無によって、橋梁応答解析結果の変化についても確認した。最大応答変位及び固有周期を動きのある格点で解析した結果、付加質量無とほぼ同じ値となったため解析に使用する加速度は、台車質量を考慮しない。

c) 照査ケースは上記ポイントの8点と台車の動作状態の5パターンの組合せから絞り込みを行う(図-8)。

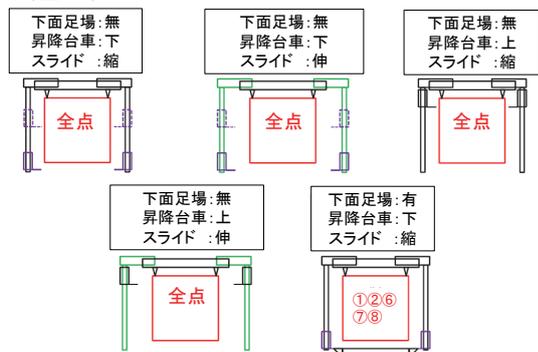


図-8 台車の動作状態

絞り込み方針は、昇降台車がシャフトに衝突するケースとした。橋軸直角方向では橋梁本体の変位応答スペクトル解析を実施し、台車の状態に応じた固有値解析結果から得られる最大応答変位を求める。さらに、1次振動モードから推定される有効質量と速度スペクトルを乗じた運動エネルギーを算出し、最大運動エネルギーを有するケースを上町、南海地震毎について照査を実施する。絞り込みの結果は、6ケースで表-3の赤枠に示す。

表-3 照査ケース

格点	下面足場 昇降台車 スライド	変位応答スペクトル値[cm]			
		上町		南海	
		無	有	無	有
6		1,268	254	700	127
10		1,416	-	734	-
20		428	301	178	667
28		199	484	64	1,050

d) 昇降台車照査のために解析を行う。係留時・係留時以外の解析モデルを(図-9)に示す。

e) 入力地震波は、各照査ポイントの橋梁耐震応答解析結果から得られた加速度である。

f) 判定基準は、側面シャフトの橋軸直角方向変位が1,600mm以内であること(状態1)、側面シャフトが許容ひずみ内であること(状態2)である。

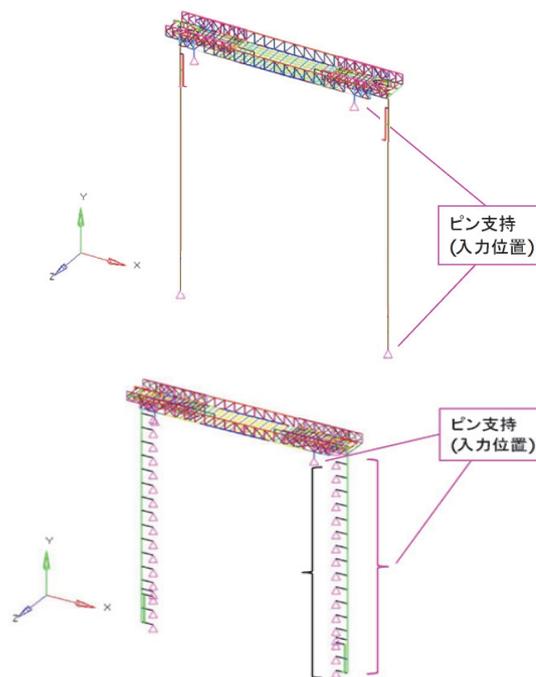


図-9 係留時(上)、係留時以外(下)の解析モデル

但し、第1判定基準を許容ひずみ、第2判定基準を側面シャフトが落下しない破断ひずみとして許容する。

3-2 解析結果

点検台車側面シャフトの応答変位は、174.3 mm であり、橋梁本体との遊間 (1600 mm) 未満のため橋梁本体に接触しない (図-10)。

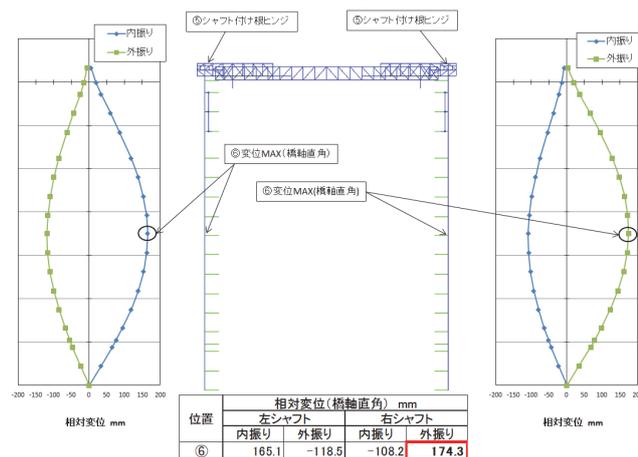


図-10 側面シャフトの最大応答変位

また、以下のことを確認した (表-4, 5)。

表-4 最大応答ひずみの解析結果

名称	詳細	解析結果	格点6 ケース① 上町			
			第1判定基準	判定	第2判定基準	判定
側面シャフト	応答ひずみ	21,102 μ	9,647 μ	NG	350,000 μ	OK

表-5 最大応力の解析結果

名称	詳細	解析結果	格点6.8.10 ケース① 上町			
			第1判定基準	判定	第2判定基準	判定
本体	上部フレーム	373 MPa	245 MPa	NG	400 MPa	OK

- 側面シャフトの応答ひずみは最大で 21,102 μ と破断ひずみ 350,000 μ を下回るため、側面シャフトは崩壊しない。
- 側面シャフトを構成している部材は全て降伏点強度または破断強度以下であり、点検台車 (本体及び側面シャフト) は本線あるいは海上に落下しない。

また、点検台車が橋梁本体に衝突した場合の橋梁本体の応力は主要構造材の応力または断面力は許容値以下であるため、橋梁本体への影響はない。

4. 溶接部の非破壊検査の結果

Dr. RING の主な構造は、アルミニウム合金溶接構造である。そのため、溶接の難易度が高く構造解析上許容応力内であっても溶接部の品質管理が目標管理値以下では安全上問題がある。そこで、製作前に試験溶接施工を行い非破壊試験を行った上で品質を確認した。

本章では、放射線透過試験及び浸透探傷試験の1例を報告する。

4-1 非破壊試験

本工事の非破壊試験方法は、放射線透過試験 (以下、RT) 及び浸透探傷試験 (以下、PT) を行った。繰り返し荷重による疲労破壊を考慮し判定基準を RT は2級以上、PT は2類以上とした。また、図-11 に主フレームにおける RT 及び PT の試験実施個所の抜粋を示す。

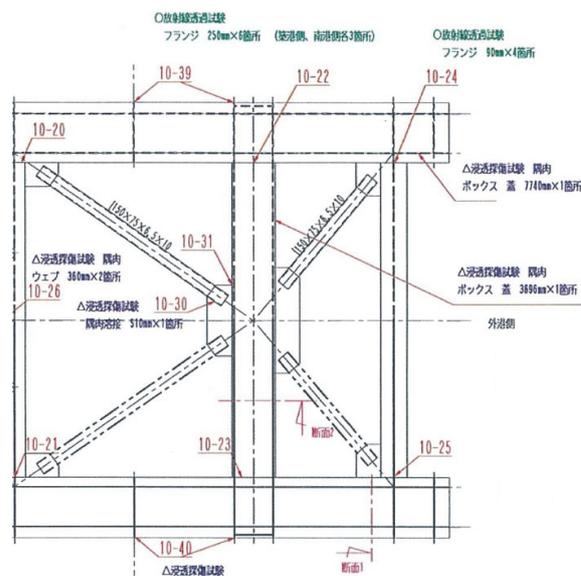
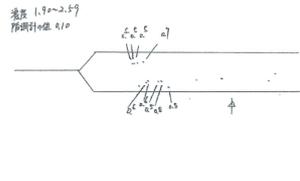


図-11 主フレームの RT, PT の試験箇所

難易度の高い溶接部位や特殊な溶接が必要な溶接部位を示し、主要構造材全ての溶接箇所に対し品質管理を行った。緑字は、RT を示し主にフランジ箇所、青地が PT を示し主に隅肉溶接部である。図-12, 13 に試験結果を示す。図-12 は、ブローホールの個数による判定から等級を決定し、上段が2級、下段が1級である。

工事No.	015			
製品No.	1PR-2P			
材質・板厚	20T			
フィルムNo.	LF1			
総合分類	1	2	3	4
9点	1	2	3	4
m/m	1	2	3	4
撮影年月日				



工事No.	016			
製品No.	1PR-2P			
材質・板厚	20T			
フィルムNo.	LF2			
総合分類	1	2	3	4
4点	1	2	3	4
m/m	1	2	3	4
撮影年月日				

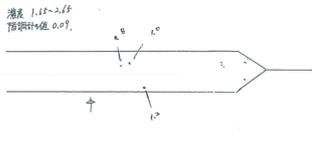


図-12 放射線透過試験結果

図-13は、PTのNG箇所をグラインダ処理にて補修を行い、再度PTにより問題のないことを確認している。



図-13 浸透探傷試験結果

5. 一括架設・撤去

本章では、特徴的な架設方法である上部台車の一括架設・撤去（図-14）について報告する。

特に時間を要した課題にポイントを絞り以下に示す。

《課題》

・事前準備

- 高速道路本線の通行止め協議
- 国際航路上の作業許可
- 風・波による起重機船の動揺による遅延

《課題解決》

・事前準備

- 交通影響予測によるう回路設定と広報活動
- 航行する船舶への事前説明

・施工時

- 位置合わせ治具の設置（図-15, 16）

位置合わせ治具の設置について説明する。54tの上部台車を吊り上げ状態から、既設レールへ据付寸法誤差±2mmの精度を要求され、且つ衝撃無く据え付ける必要がある。そこで橋軸直角方向の揺れを抑えるため、当て面にローラを接触させ転がしながら徐々に降下し、ガイドの逆V字をはめ込



図-14 上部台車の一括架設・撤去

むようにレールへ導く手法により、慎重に据え付けられるよう計画した。

作業当日は、小雨であったが懸念されていた風・波も穏やかであったため、前述の対策工もあって架設作業が順調に進み予定されていた時間を大幅に短縮し完了することができた。

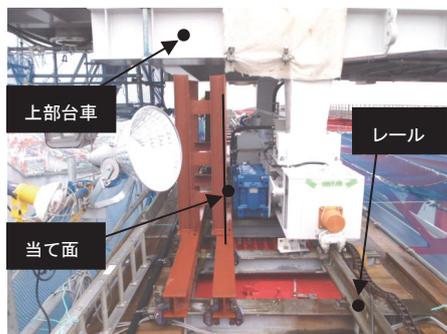


図-15 当て面とレールの位置関係

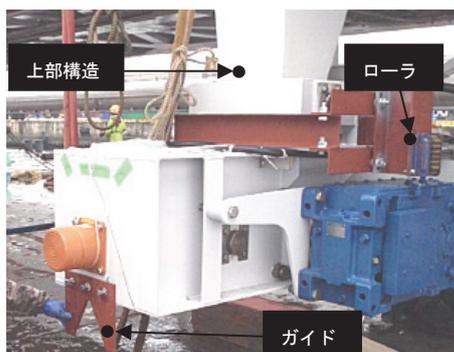


図-16 位置合わせ治具

6. 今後のメンテナンス計画

本章では Dr. RING のメンテナンス計画について定期的な点検と計画的な部品の更新について述べる。

6-1 定期的な点検

Dr. RING は、旧台車と比較し主構造及び機械部品が大幅に増えている。そのため、点検費用も比例して増えることは自明である。そこで、製作メーカーから出された点検項目を精査することで旧台車の費用で維持管理できるようにした。今後はさらに点検を重ねることによって技術力を高め点検内容を精査しコスト削減を進める。

6-2 計画的な部品の更新

Dr. RING は、構成する機械部品が複数あり更新コストの抑制および平準化を図る必要がある、さらにリスク管理および安全性の確保をしつつ、部品の更新や改造などを行うことが重要である。そこで、各部品を体系的にまとめ経過年数による更新手法の累計概算費用を算定し更新費の全体像を示し（図-17）、上述した維持管理を行ってきた旧台車の補修実績（表-5）との比較を試みる。

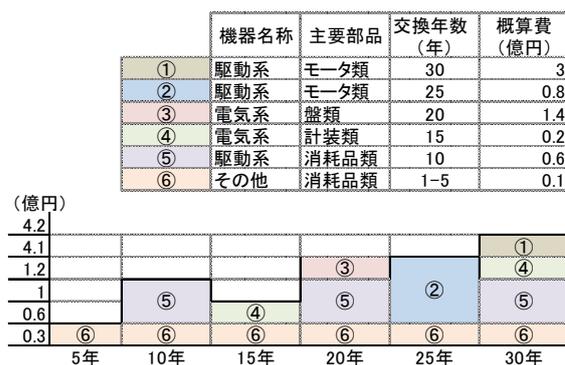


図-17 累計概算費

経過年数による更新手法の累計概算費用は、約 8 億円である。交換年数は、メーカー推奨更新年とし費用計上の内訳は、駆動系①②⑤4.4 億円、電気系③④の 1.6 億円、その他⑥0.5 億円であり、

表-5 旧台車の補修実績

補修実績	概算費 (億円)	備考
デッキプレート補修工	0.2	2箇所
ゴンドラ補修工	0.5	12基
トロリ更新費	2	(未実施)

駆動系の割合が大きい。

次に、維持管理を行ってきた旧台車の補修実績を見ると、故障実績がほとんどなく駆動系の更新もしくはオーバーホールは実施されていない。

補修実績の内容は、足場であるデッキプレート腐食による大掛かりな補修を行っている。また、ゴンドラでは、ワイヤの素線切れやブレーキ機構に滑りなどがあり、経年に応じた補修対策を行っている。トロリについても大規模な更新はしていないが、碍子関係の障害が多く発生し補修を行っている。

旧台車は、構造本体に SS 材を使用したため、

上述した補修を行っているが Dr. RING では改善を行い、構造本体に耐海水性の優れたアルミニウム合金 A5083 を採用し補修費用を掛けることなく長期の使用に耐えるよう考慮している。ゴンドラでは、基本的に同じ仕様のため旧台車と同様に経年に応じた補修が必要になる。電気系統は、自家発電機を搭載しているため、旧台車の故障の多かったトロリ方式と比較して、莫大な補修費用は掛からないと思われる。

よって、部品の経過観察から健全度を確認しコストを抑えながら延命することが可能ではないかと考えている。

7. まとめ

本稿は Dr. RING の設計・施工における検討内容・品質管理・据付について、膨大な資料から特に安全性に関わる重要なポイントをまとめ記述したものである。本知見が、将来の改造あるいは補修・更新計画にあたり生かされると考える。

参考文献

- 1)厚生労働省：ゴンドラ構造規格, 2003.
- 2)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 2012.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE MINATO BRIDGE INSPECTION TROLLEY-- Dr. RING FOR LONGER SERVICE LIFE OF THE URBAN EXPRESSWAY

Hisayuki KUROSAKI, Masayasu SHIMOKATA and Koichi SUGIOKA

Although damage to the Minato Bridge has been increasingly significant, installation of maintenance scaffolding is difficult due to its truss structure consisting of numerous joints and members located at height above the sea. In an effort to establish more effective and efficient maintenance of bridges for longer service life of the urban expressway, Hanshin Expressway has developed Dr. RING as an exclusive trolley for repair and inspection of the Minato Bridge. The new trolley enables maintenance activities over a substantially larger area compared to old ones. The area reaches 100% on the underside of the lower deck when combined with a lift attached to the underside scaffolding. This report describes the design, manufacture, construction and maintenance of Dr. Ring, placing a special focus on safety considerations.

黒寄 寿行



阪神高速道路株式会社
大阪管理局 保全部
施設保全課
Hisayuki Kurosaki

下方 正康



阪神高速道路株式会社
大阪管理局 保全部
施設工事課
Masayasu Shimokata

杉岡 弘一



阪神高速道路株式会社
大阪管理局 保全部
保全設計課
Koiti Sugioka