

4月25日橋とヴァスコ・ダ・ガマ橋を訪ねて

辻 幸和*

ポルトガルの首都で同国最大の都市であるリスボン市のテージョ川に1966年に架設された吊橋である4月25日橋の建造とその後1999年の改修についてまず紹介する。また4月25日橋の混雑を軽減する目的で、その約13 km上流側の三角江に架設されたヴァスコ・ダ・ガマ橋の建造の経緯とその特徴を紹介する。ヴァスコ・ダ・ガマ橋はリスボン国際博覧会の開催直前の1998年3月に開通した全長が17.2 kmのPC長大橋で、その建造には120年間の供用を目的にした耐久設計が実施されている。

キーワード：4月25日橋，ヴァスコ・ダ・ガマ橋，PC斜張橋，耐久設計

1. はじめに

ヴァスコ・ダ・ガマ橋（Ponte Vasco da Gama）は、ポルトガルの首都リスボン市の東部を流れるテージョ（Tagus）川河口の三角江に架けられたPC斜張橋を含むPC橋梁群である。リスボン市近郊のサカヴェンとモンチジョを結んでいて、全長は17.2 kmあり、ヨーロッパでもっとも長い橋として知られている。1995年に着工され、リスボン国際博覧会の開催直前の1998年3月29日に開通した。ヴァスコ・ダ・ガマ橋という橋名は、航海者ヴァスコ・ダ・ガマのインド到達500周年を記念して付けられた。

4月25日橋（Ponte 25 de Abril）は同じテージョ川に1966年に架設された吊橋で、橋長が2 277 mは当時ヨーロッパでもっとも長い吊橋として知られていた。その後1998年のヴァスコ・ダ・ガマ橋の架設の後、1999年に鉄道が増設された。

本稿では、4月25日橋の建造と改修についてまず紹介するとともに、ヴァスコ・ダ・ガマ橋の建造の経緯とその特徴を、120年間の供用を目的にした耐久設計についても言及して紹介する。

2. リスボンと4月25日橋

リスボン（Lisbon）市は、ポルトガルの首都で同国最大の都市である。市域人口は54万余人を有し、市域面積は85 km²に過ぎないため、高い人口密度を擁している（写真-1）。リスボンの都市的地域は行政区としての市域を越えて広がっており、人口は300万人を超え、面積は約1 000 km²を占めており、欧州連合域内では11番目に大きな都市圏を形成している。

リスボン市はまた、テージョ川の流域に発達し、小高い丘に街並みがいくつも形成されている（写真-2）。

テージョ川には、4月25日橋の吊橋が1966年に開通している。橋長が2 277 mで、中央径間が1 013 mであり、4車線の対岸のアルマダと結ぶ大規模な道路橋である（写真-3、4）。開通時からサラザール橋（Ponte Salazar）と



写真-1 リスボンの小高い街並み



写真-2 テージョ川を背景にしたリスボンの街並み



写真-3 4月25日橋

* Yukikazu TSUJI：NPO 法人 持続可能な社会基盤研究会理事長，群馬大学・前橋工科大学 名誉教授

命名されていたが、1974年のカーネーション革命が起きた日から名前をとって、4月25日橋へと改名された。

なお4月25日橋はその後最終的に改修され、道路が6車線に増えた。また1999年には建設の当初から構想のあった下段のトラス部分に複線の鉄道が増設されている（写真-5）。このように、改修に伴う活荷重等の増大に対して、主ケーブルの増設を行ったのは珍しい事例である。

3. ヴァスコ・ダ・ガマ橋の特徴

ヴァスコ・ダ・ガマ橋は、4月25日橋の混雑を軽減する目的で、その約13kmテージョ川の上流側の三角江に建設された。モンチジョからサカヴェンに向かう上り方向のみに、通行料金が課されている有料道路である。サカヴェン側ではA1、第2環状、A8と、モンチジョ側ではA12とにそれぞれ接続している。

ヴァスコ・ダ・ガマ橋は、以下的高架橋と中央斜張橋で構成されている（図-1）。

- ① 北部高架橋（11径間PCT桁橋：488m）、
- ② エキスポ高架橋（12径間プレキャストPC2箱桁橋：672m）、
- ③ 中央斜張橋（H形2主塔PC斜張橋：830m）、
- ④ 中央高架橋（80径間PC2箱桁橋：6531m）（写真-6）、
- ⑤ 南部高架橋（85径間PC箱桁橋：3825m）

ヴァスコ・ダ・ガマ橋は、欧州連合（EU）の格差是正基金を導入したPFI（民間資金主導）事業として実施された。建設事業主体はNOVAPONTEでBOT（Build-Operate-Transfer）方式で行われ、実施はポルトガルだけでなくフランスなどからなる国際コンソシウム（consortium）のLusoponteが担当した。そして、公式エキスパートを著名なフランスのMichel Virlogeux博士が務め、施工会社としてフランスのCampon Bernardも加わっている。Michel Virlogeux博士とCampon Bernard社は、フランスのミヨー高架橋の構造設計者と施工会社でもあった。

中央斜張橋は、全長が830m、メインスパンが420mのPC斜張橋である（図-2）。斜材は、2面吊りのセミファン形24本で構成されている。主塔はH形の鉄筋コンクリート造で、高さは155mである。PC主桁は、幅員が30.9mで、片側3車線である（写真-7、8）。

着工は1995年2月で、約3年後の1998年3月29日に開通した。維持・管理は4月25日橋とともに前述したLusoponteによって行われており、1996年1月より40年間の料金徴収権が認められている。なお、1998年の5月から9月まで、ヴァスコ・ダ・ガマ橋の近くのテージョ川沿いで、リスボン国際博覧会が盛大に開催された（写真-9）。

4. ヴァスコ・ダ・ガマ橋の耐久設計¹⁾

ヴァスコ・ダ・ガマ橋は、耐用年数120年の条件で耐久設計が実施された。コンクリート強度、およびかぶりの規定を下記の通り設けているほかに、環境区分毎に耐久性の限界値を定め、実証実験を行って性能を確認している。

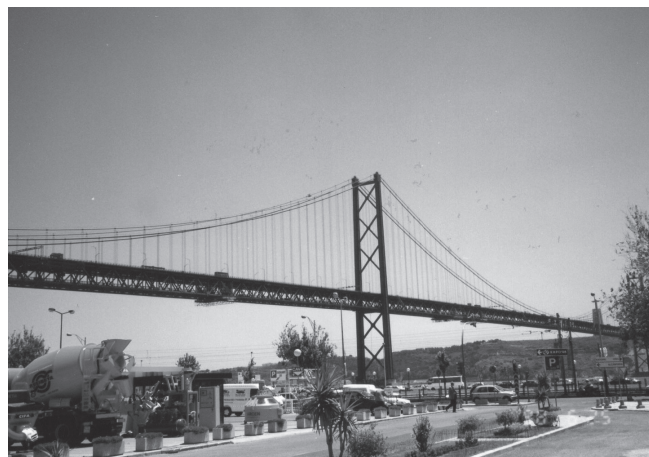


写真-4 国際展示場からの4月25日橋



写真-5 改修工事中の4月25日橋

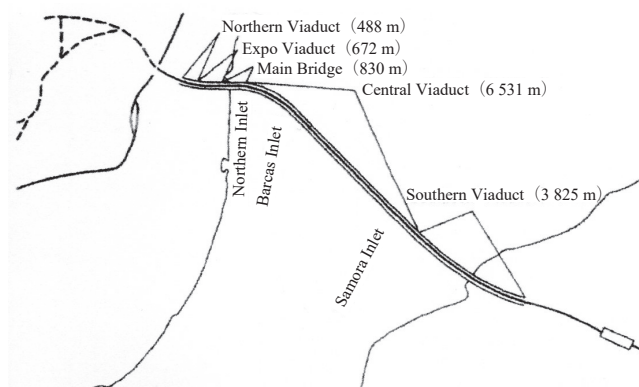


図-1 ヴァスコ・ダ・ガマ橋の工区¹⁾

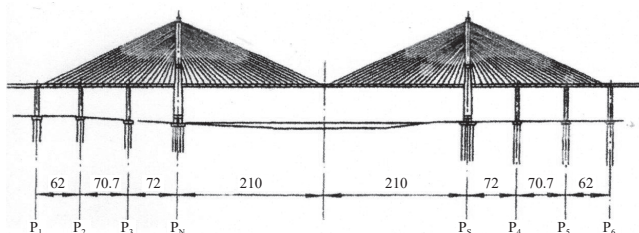


図-2 中央斜張橋の一般図¹⁾

耐用年数は、塩化物イオン濃度が鉄筋の位置でその腐食限界濃度のセメント質量の 0.4 % に達するときまでとし、塩化物イオンの拡散を“Fick の第 2 法則”により算定している。なお算定にあたり、コンクリートの拡散係数を一定値とせず、“もっとも安全側に見積もった耐用年数が 120 年を超えている。”としている。

その耐久設計の概要を、以下に示す。

4.1 環境条件

大西洋からの影響を受けるため、テージョ川の塩分濃度は海水の飽和濃度の 85 % であるとし、架橋地点での潮汐による水面の昇降は 4.0 m であると設定している。そのほかの気象条件は、以下のとおりのように温暖である。すなわち、① 不凍結、② 温和な気温 (10 ~ 22 °C)、③ 湿度は 70 ~ 90 %RH の間に分布、④ 日照時間は 14 日 / 月 ~ 25 日 / 月、⑤ 平均風速は 13 km/h ~ 21 km/h (3.6 m/s ~ 5.8 m/s)、⑥ 降水量は 0 ~ 110 mm / 月、700 mm / 年であると、それぞれ設定している。

河川上にあたるのは、中央斜張橋の主橋部、中央高架橋、南部高架橋の 800 m 部分である。航路クリアランスは、主橋部 (大型船舶用) が 45 m、中央高架橋部 (中型船舶用) が 2 × 30 m である。

4.2 設計の仕様

入札時の契約書のなかには、耐用年数 120 年を実現するための特記仕様は設けられていなかった。しかしながら、以下に示す設計用コンクリートの強度とかぶりが仕様に記載されていた。

(1) コンクリート強度

強度は、1 辺 15 cm 立方体の供試体である。直径 15 cm または 10 cm で高さがその 2 倍の円柱の供試体では、立方体の約 80 % に相当する強度である。

① C40 (圧縮強度 40 N/mm²) : 基礎構造、陸上部の上部構造の防護壁、② C45 (圧縮強度 45 N/mm²) : 海上部の上部構造の防護壁、中央高架橋および南部高架橋の主桁、③ C50 (圧縮強度 50 N/mm²) : 斜張橋の主桁

(2) かぶり、

① 7 cm : 海水の影響を受ける環境 (ポルトガル標準潮位 +10 m の下部)、② 5 cm : 上記以外の部分 (ポルトガル標準潮位 +10 m の上部)

4.3 設計手順

(1) 材料の選定

使用材料を選定するための適用基準は、① E 378 (ポルトガル規格) および ② ENV 206 (暫定欧州規格) である。ENV 206 (コンクリート仕様、性能、製造および適合性) は、2000 年 12 月より EN 206-1、2013 年 12 月より EN 206 にそれぞれ欧州規格として制定、改正されている。

(2) アルカリ骨材反応

NFP 18590 (フランス試験規格) に基づく高圧蒸気による膨張試験の結果、反応性の無いことが確認された骨材を使用する。

(3) 耐久性に関する基準

専門家の参加のもとに、まずは NOVAPONTE (建設事業主体) と GATTEL (政府事業認可機関) の間で設計基準



写真 - 6 中央高架橋



写真 - 7 中央高架橋側の中央斜張橋の主塔と斜材



写真 - 8 2面吊りのセミファン形の斜材と主塔



写真 - 9 リスボン国際博覧会会場からの中央斜張橋

を整備することが行われた。整備された表 - 1 に示す環境区分および表 - 2 に示す耐久性限界値の基準は、AASHTO による試験値（材齢 28 日と 6 ヶ月）、塩化物イオンの拡散係数（LUPING）、中性化深さの性能である。そしてその後、公的研究機関の協力のもとで実証実験が行われた。なお、耐久性限界については、耐久性を確保するための限界値に関する提案に対しては、実証実験を行い、所定の性能を満足する結果を得ている。さらに、供用後もモニタリング（定期的なコアの採取による各種物性値の計測）が行われている。

4.4 耐用年数の照査

(1) 予想耐用年数の定義

塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食について、鉄筋の腐食発生限界濃度 C はセメント質量に対して 0.4 % としている。また、コンクリートの拡散係数は、構造物から採取されたコアについて、“LUPING の方法²⁾”によって計測されている。

(2) Mangat と Molloy の理論³⁾

塩化物イオンの拡散モデルは、“Fick の第 2 法則”に基づいている。しかし、“Mangat と Molloy による研究成果”によると、コンクリートの拡散係数 D は一定値ではなく、その環境状況によって変化すると報告されている。その研究結果を採り入れて表 - 3 に示すように、もっとも安全側に見積もっており、耐用年数が 120 年を超えている。

5. おわりに

ポルトガルの首都リスボン市の東部を流れるテージョ川河口部に架けられている吊橋の 4 月 25 日橋および PC 斜張橋を主体とするヴァスコ・ダ・ガマ橋を紹介した。両橋はいずれも、欧州で美しい 15 橋に含まれている。なおヴァスコ・ダ・ガマ橋は、リスボン国際博覧会の開催直前の 1998 年 3 月に開通し、全長は 17.2 km あり、ヨーロッパでもっとも長い橋として知られている。その耐用年数が 120 年となる耐久設計についても解説した。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：Vasco da Gama 橋の耐久設計、高橋脚 PC 橋委員会、資料 - 4、2001 年 3 月 28 日
- 2) Luping T., Nilson L. O. ; A Study of The Quantitive Relationship between Permeability and Pore Size Distribution of Hardened Cement Paste, Cement and Concrete Research, Vol.22, No. 4, pp. 541-550, 1992
- 3) P. S. Mangat and B. T. Molloy ; Chloride binding in concrete containing pfa, gbs or silica fume under sea water exposure, Magazine of Concrete Research, 47 (171), pp.129-141, January 1995

表 - 1 環境区分の定義

環境区分	構造物の状態
1	地中構造物
2	海水に浸かっている構造物
3	海洋構造物（ポルトガル標準潮位 +5 m の下部）
4	塩分の影響を受ける構造物（ポルトガル標準潮位 +5 m ～ +10 m）
5	普通構造物（ポルトガル標準潮位 +10 m の上部）
6	海洋の影響を受けない構造物

表 - 2 NOVAPONTE（建設事業主体）の提案した耐久性限界値

環境区分	コンクリートの品質特性	AASHTO 材齢 28 日 (クーロン)	AASHTO 材齢 6 ヶ月 (クーロン)	LUPING 材齢 6 ヶ月 (m^2/s)	中性化深さ (mm)
1	$W/C \leq 0.42$ $C \geq 400$ (IV)	< 5 000	不適用	不適用	< 10
2	$W/C \leq 0.35$ $C \geq 430$ (IV)	不適用	不適用	不適用	不適用
3	$W/C \leq 0.33$ $C \geq 430$ (IV)	< 5 000	< 1 500	< 1×10^{-12}	< 10
4	$W/C \leq 0.33$ $C \geq 430$ (IV)	< 5 000	< 1 500	< 1×10^{-12}	< 10
5	$W/C \leq 0.40$ $C \geq 400$ (I)	< 5 000	不適用	不適用	< 10
6	$W/C \leq 0.42$ $C \geq 400$ (I)	< 5 000	不適用	不適用	< 10

表 - 3 耐用年数の算出結果（“Mangat と Molloy による研究成果”を考慮）

コンクリートの種類	環境区分	水セメント比	セメントの種類	拡散係数 (m^2/s)	耐用年数 (年)
C40	1	0.41	400 (IV)	8.3×10^{-10}	123
C45	2	0.35	450 (IV)	9.0×10^{-10}	239
C40	3, 4	0.39	360 (I)	3.0×10^{-10}	300 以上

【2021 年 4 月 5 日受付】