



### 斜張橋の雷防護システム

A. Rousseau, SEFTIM<sup>1</sup>、L. Boutillon, VINCI Grands Projets<sup>2</sup>、A. Huynh, FREYSSINET<sup>3</sup>

抄録：2005年1月27日、世界で最も長い斜張橋の1つが落雷の被害を受け、ステークケーブル1本が破断した。破断のメカニズムを解明して適切な雷防護システムを開発するため、ステークケーブル全体あるいは構成部品に対して、今回の事故を綿密に研究した。金属工学的検査、機械的試験、高電圧試験、サージ電流試験等の多くの試験を行った。調査の最終段階で本件の破損の予測シナリオを立て、既存の雷防護システムの改良を行い、実行に移した。

索引語：橋、高電圧試験、インパルス電流、雷防護、ステークケーブル、規格、試験

#### I. 序論

1月27日に世界で最も長い斜張橋の1つが落雷の被害を受け、最上部ステークケーブルから出火してこのケーブルが焼け落ちた。ステークケーブルは、ワックスで防護され、高密度ポリエチレンで押し出し成形された層で被覆された溶解亜鉛めっきPC鋼より線から成るモノストランドを、高密度ポリエチレン(HDPE)ダクト内部に、並行的に挿入することで作られている。水平方向の落雷が10時頃に橋の近くで目撃された。監視センサーは落雷による構造上の最初の

影響を10時15分に記録している。連続する熱と張力の重複効果により、ストランドが破断した。11時22分にはケーブルが主桁に崩落している。最初の点検および計算結果から、橋の構造体は落雷の影響を受けておらず、車両の通行を再開できることが即座に判明した。しかし、ぶら下がっているステークケーブルを撤去し、更なる解析を行うのに時間がかかったため、全面的な再開は2月1日となった。(FKK注記：2日後には片側通行を行っている。2/1以降全車線開通。一ヶ月後に、片側通行としながら、破断した上部ケーブルを取り付けた。その間6日間))

出火したのは、クロスタイを取り付けるための仮のカラー(環)と呼ばれる金属部分に近いところであった。これらは上部ステークケーブルに2つ、均等に取り付けられている。これは暫定的なカラーであり、現時点で使用することはないが、風の影響下における橋の動的挙動を向上させるために将来使用する可能性のあるものである。

ステークケーブルのような構造物は通常は単独で雷の高電流に耐えることができるため、雷防護を必要としない。世界の多くの同型の橋の事例(1,000橋以上)を見ても、雷防護は実際に不必要である。ステークケーブルへの落雷はあるかもしれないが、モノストランドが破断することは決してなかった。本件の橋の雷防護システムは、主桁に設けられている等電位と、2本のアース線と水中アースシステムに接続している各塔(本件の橋には4本の塔があった)上部のESEだけであった。ESEが全長300mにおよぶステークケーブル全体を防護することができないのは明らかであった。

世界の様々な地域にある他の同型の橋では(ギリシャよりもさらに雷の活発な地域であっても)ステークケーブルがまるまる1本

<sup>1</sup> A. Rousseau, SEFTIM 49 rue de la bienfaisance  
94300 Vincennes, France

<sup>2</sup> L. Boutillon, VINCI Construction Grands Projets  
5 cours Ferdinand de Lesseps  
92851 Rueil-Malmaison Cedex, France

<sup>3</sup> A. Huynh, FREYSSINET  
1 bis rue du Petit Clamart  
78140 Vélizy, France

破断したという事態が過去に一度も起こったことがなかった。過去に一度も起こったことのなかったステークケーブルがまるまる1本破断したという事態が今回の落雷事故ではなぜ、発生したのであろうか。

## II. 調査試験

今回の破断のメカニズムを理解して適切な対策を講じるため、以下の試験を実施した。

- ・被害を受けたストランドと受けていないストランドに対する機械的試験
- ・被害を受けたストランドの落雷ポイントにおける金属工学的検査
- ・小型のステークケーブルサンプルに対する予備高電圧試験および雷電流試験
- ・原寸大のステークケーブルサンプルに対する雷高電圧試験
- ・原寸大のステークケーブルサンプルに対する雷高電流試験

### A. 機械的試験

破断したステークケーブルから6つのサンプルを採取し、フランスのフレシネー社の試験所へ搬送した。斜張橋用楔を用いた引張り試験を全サンプルに対して行った。最大負荷における伸び率は2以上である。発火したストランドの伸び性能と引張り強度はやや低減していたものの、仕様の公差内であった。

### B. 金属工学的分析

落雷の痕跡が認められる全サンプルをフランスのCETIM(機械工業技術センター)へ搬送し、専門家の分析を求めた。

サンプルは、溶解の痕跡が1箇所認められるものが10、2箇所認められるものが1つであった。3つのサンプルを選別し、詳細な検査が行われた。全ての損傷は肉眼検査では同様であった。この検査の目的は落雷によって生じた金属工学的変化を定量化することであり、以下の検査手法を用いた。

- ・写真を用いたMEB顕微鏡および肉眼検査による損傷の形態の分析(図1参照)
- ・顕微分光計による損傷時の金属の化学成分分析
- ・微小组織の変化の検出を目的とした、顕

微鏡検査による損傷の金属工学的分析

- ・微小组織の変化の検出を目的とした、損傷を通したスチールワイヤの微小硬度試験

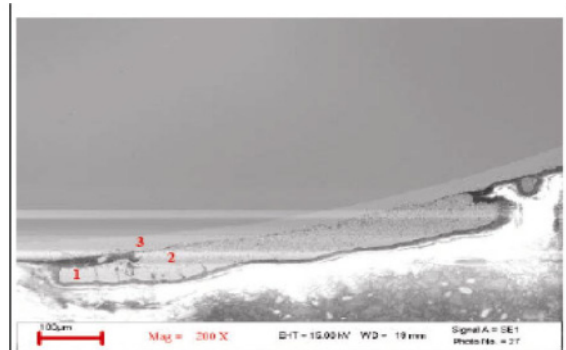


図1: 観察された痕跡上の、亜鉛の多孔区域の詳細。上部の灰色の区域は鋼材(変化なし)。

検査および試験の結果から、落雷によって生じる直接的な損傷は亜鉛層(亜鉛が溶解するだけ)に限定され、ストランドの鋼材は影響を受けていないとの結論が導かれた。

補足として、ストランドの破断領域を検査した。脆性破断はなく、引張り強度の限界を超過したことによる破断を示すダクタイルな組織が認められただけであった。

### C. 予備雷試験

落雷によって起こり得る影響を理解するため、ギリシャのELEMKO雷研究所にて小型のサンプルに対する試験を実施した。高電圧試験により、ステークケーブルの一部である各ストランドの破壊電圧は100kVであることが分かった。IEC 62305-1に従って100kA 10/350での試験を、また50kA 10/500のより長い波形でも試験を行った。ストランドとHDPEダクトを組み合わせたサンプルに対するより長い波形の試験のみがわずかな炎を発生したが、4秒後には炎は消えてしまった。この炎は明らかに、外部プラスチックダクトに高温液体金属が飛び散ってプラスチックが気化し、燃えたものである。これらの予備試験から、この後の試験計画に対する興味深い幾つかのアイデアが得られた。

### D. 雷高電圧試験

最も可能性の高い落雷箇所ならびに考えら

れる雷防護システムを決定するため、8 m の最上部ステーケーブルに対する高電圧試験を実施した。試験は標準的なステイと仮クロスタイ取り付け用カラー付きステイに対し、雷防護ワイヤ付きステイと共に行われた。これらの試験に必要な高電圧および広いスペースに対応するため、試験はフランスの CEAT で行われた。CEAT は航空機の試験を行うために使用されている場所である。上部電極は  $10 \times 5 \text{ m}^2$  のプレートで、試験サンプル上に配置した。様々な構成で比較試験を行った。ステーケーブル上 20 cm の位置にアース式雷防護ワイヤを取り付けた際の雷捕捉ポイントは雷防護ワイヤであったが、雷防護ワイヤがない場合の雷捕捉ポイントは、隣接するステーケーブルをより大きいアース金属チューブに置き換えた試験においてさえも、金属カラーが多かった。完全組立品の火花電圧を確認するための試験も実施した。試験設備の関係から、火花電圧は 600 kV 以上であることしか分からなかったが、実際、およそ 900 kV ほどでなければならないことが計算上示された。

### E . 雷高電流試験

炎の発火の再現には長時間の電流試験の実施が重要な要素であることが予備試験から明らかであったため、700 C での試験も可能なドイツの DEHN 研究所にて長時間の試験を行った。試験サンプルはほとんどの試験で 3 m のものを使用したが、メカニズムがよく分かっている場合には、より現実に近いことから 1 m のサンプルを使用した。アークの開始には銅製のヒューズワイヤを用いた。



図 2 : ダクト内の 1 本のストランドと結ばれた

### ヒューズワイヤ

最初に、銅製のワイヤをダクト外のストランドと直接接触させて試験を行った。680 C もの電荷でも、炎は数秒後に消えた。

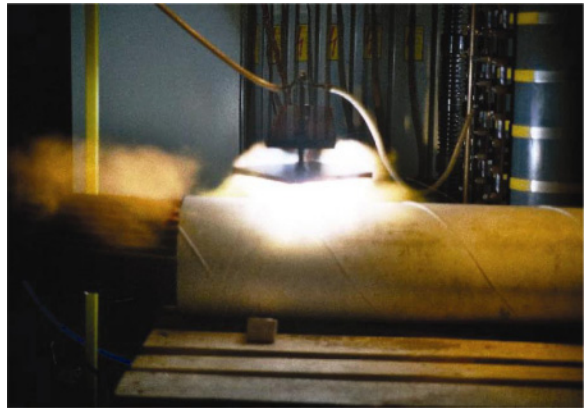


図 3 : 自由長での試験

次いで、上部ステーケーブルを再現した完全組立品に対する試験を行った。自由長での試験により、予測された高い耐火性が確認された。IEC 62305-11 に従ったインパルス大電流 (最大 50 kA) と長時間 (最大 680 C) を組み合わせた試験においてさえも、炎は 5 秒後に消えた。カラー周辺で行った試験では、炎試験で得られたのと同様の結果が示された。自然には消えず、我々が消さなければならなかった小さな炎を発生させるには、500 C の電流と直径 10 mm の穴が必要であった。

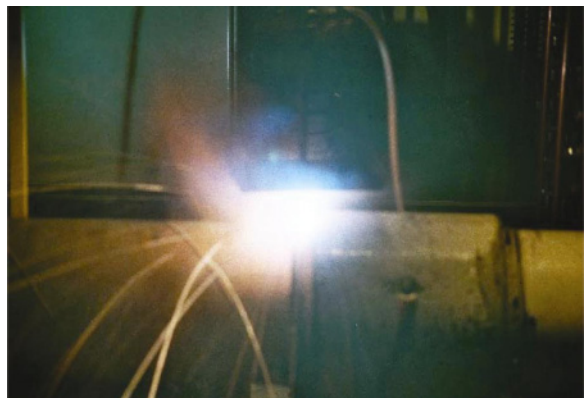


図 4 : カラー周辺での試験

### III . 調査試験に基づく予測シナリオ

上部ステーケーブルは、落雷を誘発するポイントである上部側面の上部カラー付近にて雷に撃たれた可能性が非常に高い。



雷の力により、ステークケーブルの外部HDPEダクトに直径10mmを超える穴が開いた。雷は次いで、少なくとも11箇所ですトランドを襲い、ワイヤの亜鉛層表面を溶解させた。カラー周辺の状態と電荷の移動により、HDPEダクトの穴の縁に小さな炎が発生した。風と、おそらく降っていたであろう雨によっても、炎は消えなかった。ダクトの炎が大きくなり本格的な燃焼が始まると、その熱はストランドへと移った。

以上の結果から、雷防護システムの改良においては以下に重点を置くこととした。

- ・ クロスタイ取り付け用カラー周辺には難燃材を使用することにより、その周囲の状態を改良して発火を防ぐ。
- ・ 上部ステークケーブルの上に雷防護ワイヤを取り付け、そのステークケーブルへの落雷の可能性を低減する。
- ・ クロスタイ取り付け用カラーが集中的な落雷ポイントとならないようにする。

また、塔の雷防護システムを新規規格の IEC 62305-3 に適合させて改良する。

#### IV . 雷防護システムの強化

橋全体の雷捕捉領域を、IEC 62305-2 に従って  $2.1 \text{ km}^2$  と定めた (図5 参照)。ギリシャの当該地域の年間雷雨日数は約 30 日であるため、落雷の数は年間 6.3 回ほどと予測される。同様に、ステークケーブルへの落雷の予測数は年間 4 回と推定された。アース線に取り付けられたサージカウンターは、2004 年 8 月から 2005 年 6 月までに少なくとも 21 の落雷が塔にあったことを示している。

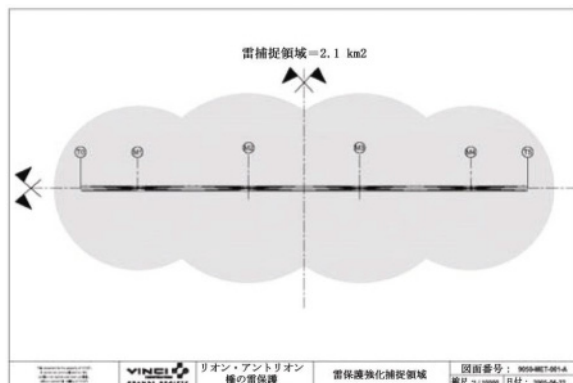


図 5：算出した雷捕捉領域

これは年間雷雨日数データから推測できる数の 3 倍である。塔への落雷の数をより正確に数えるため、電流と電荷を測定するタイムスタンプ付きの新しいサージカウンターを取り付けることとする。

本橋地点における正確な落雷の数がいくつであれ、雷防護システムを改良し、また特に仮クロスタイカラーへの落雷の集中を防止することとした。そのために、以下を決定した。

- ・ ステークケーブル上部に雷防護ワイヤを設置して、大半の落雷を遮る。
- ・ 新しい 62305-3 規格 (この報告書作成時点ではまだ草案段階であった) に完全に適合した雷防護システムを塔に施す。

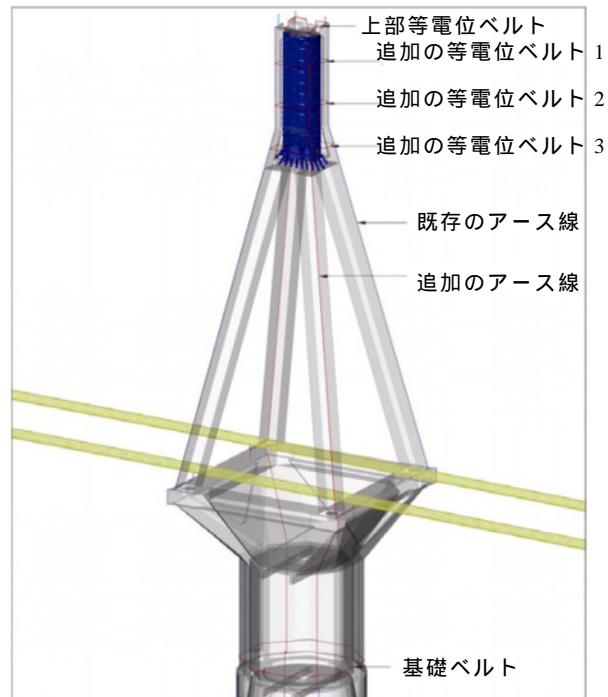


図 6：塔の雷防護システムの改良

#### A . 塔の雷防護の強化

塔の頂部の角と縁が集中的な落雷ポイントとなる可能性が高かったため、各角に 4 本のロッドを有する環状導体を取り付けた。機能を確実にするため、さらに 2 つのアース線と 3 つの円筒電極を塔の頂部から金属ステークケーブルアンカレッジ箱の下部にわたるまで均等に設置した。環状導体を海面位置にさらに 1 つ取り付け、4 つのアース

システム間に電流が共有されるようにした。塔の金属部分の等電位ボンディングも施された（図 6 参照）。

#### B. ステーケーブルの雷防護

高強度のステンレススチールストランドを使用して上部ステーケーブル上に雷防護ワイヤを設置し、塔のマスト上部の環状導体に接続した。雷防護ワイヤは上部ステーケーブルに並行して走っており、吊材によって主桁に据え付けられている中央の部品とスパン中部でつながっている。雷防護ワイヤの張力とステーケーブルストランドの張力を近付けて同様のたわみを持たせることにより、雷防護ワイヤとステーケーブル間の最小距離を保証する。強風と雷が同時に起こった場合でも雷防護ワイヤと上部ステーケーブル間の距離が常に火花電圧を超えているようにするため、安全離隔距離を計算した。最終的には、予想外に大きな落雷を受けても雷防護ワイヤが主桁上に落下しない構造となっている。

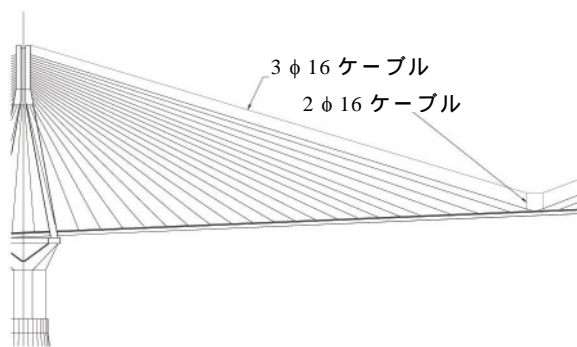


図 7：雷防護ワイヤおよびステーケーブル

## V. 結論

2005 年 1 月 27 日の事故の研究をほぼ 1 年間にわたって徹底的に行った。世界中の斜張橋（ギリシャよりも環境の厳しい地域であっても）における長い経験からは、我々は自ずと以下のように認識している。このような大量のスチールの塊が落雷によって重大な損傷を受けるとは思われない。ステーケーブルには通常特別な雷害対策を講じることはせず、雷防護を施すのは塔だけである。実験室内では、雷のインパルス電流が炎を発生させることはできなかったことは明らかである。橋の上では風と雨が あったため、状況は間違いなくより致命的なものであった。実験室において、極めて大きく長時間の電流を用いて、非常に特殊な構成の下でのみ、初めてそのような状況を作り出すことが可能であった。今回行った研究により、事故の予測シナリオを提案・立証することができた。本件のような事故が起こる可能性は極めて低いが、雷防護ワイヤの使用によるステーケーブルへの雷の直撃数の減少を計ること、また、仮クロスタイカラー周辺の局所的な部分での（電荷の中性に）よる炎の発生の防止すること等により、現存の橋梁用の雷防護システムを改良することを決定した。

## VI. 参考文献

IEC 62305-1, *Protection against lightning part 1 general principles*, January 2006.