実雷時に鉄道信号用ケーブルおよびレールに発生する雷過電圧の観測

[電]小野 雄人
[電]藤田 浩由
[電]新井 英樹(鉄道総合技術研究所)
山崎 広達
小幡 信夫(東日本旅客鉄道)

The Observation of Lightning Surge Voltages on Railway Signalling Cables and Rails

○Yuto Ono, Hiroyuki Fujita, Hideki Arai (Railway Technical Research Institute) Hirotatsu Yamazaki, Nobuo Obata (East Japan Railway Company)

In recent years, the number of lightning damages in railway signalling systems is increasing because electronic devices are widely used for railway signalling equipment and they are easily damaged by lightning surges. In this research, we investigate the correlation of lightning surge voltages on railway signalling cables and rails with lightning conditions, such as the stroke current and the strike position. This paper describes the lightning risk estimation of railway signalling equipment against lightning conditions.

キーワード:信号設備, 雷害, 雷過電圧, 雷電流, 落雷位置, 接地 Key Words: Signalling equipment, Lightning damage, Lightning surge voltage, Stroke current, Strike position, Grounding

1. まえがき

鉄道信号設備への電子機器の導入に伴い, 雷被害が数多 く発生しており, 効果的な雷害対策が求められている。

筆者らはこれまでに、実際の落雷時において現用レール や試験用敷設ケーブルに発生する雷過電圧を測定し、落雷 条件(雷電流,落雷位置)との相関について検討してきた ¹⁾²⁾。本論文では、ケーブルのシールドの接地条件を変化さ せた時の結果について述べる。また、地上に敷設された線 と架空線に発生する雷過電圧について比較した結果を述べ る。

2. 試験概要

ケーブルやレールに発生する雷過電圧の観測は、日本有数の多雷地域にある単線・非電化の営業線において、2010 年および 2011 年の夏季(6月~10月)に発生した雷を対象として行った。単線・非電化区間の選定理由は、外界からの誘導ノイズを極力防ぐためである。

測定概略図を図1に示す。現用レールおよび試験用敷設 ケーブル ($2mm^2 \times 4P$ の SEE-SL ケーブルと $2mm^2 \times 8C$ の SVV ケーブル) と大地間に発生する雷過電圧の測定を 行った。測定システムのトリガレベルは $\pm 125V$ とした。 図2に示すように、ケーブルの芯線の両端には、信号設備の負荷を模擬した 1kΩの抵抗を挿入した。また、図2 および図3に示すように、SEE-SLケーブルのシールドの 片端を接地した場合(試験条件1)と、両端開放した場合 (試験条件2)の2種類の試験条件を用意し、試験期間の 途中で試験条件を変更して、試験を実施した。

一方,地上に敷設されたケーブルやレールに発生する雷 過電圧と架空線に発生する雷過電圧の比較を行うため,架





空配電線より引き込まれている電源線についても測定を実施した。なお、電源線に発生する雷過電圧のトリガレベルについては±625Vとした。

ケーブルの芯線、シールド、レール、電源線のいずれか にトリガレベル以上の雷過電圧が発生した場合に、GPS 時 計による発生時刻とともに、全ての雷過電圧波形データを 記録する構成とした。波形データの記録長は 102.4µs(50ns ×2048 サンプル)とした。

3. 雷過電圧発生メカニズム

落雷時に発生する強いインパルス性の電磁界は,静電界, 誘導界,放射電磁界が複合したものであり,ある程度の遠 方地点では,それぞれが離隔距離の・3乗,・2乗,・1乗に比 例するので,放射電磁界が優勢となる。放射電磁界で発生 する電圧 Vは(1)式によって表される³⁾。

 $V = \lambda / (2\pi\varepsilon_0 r)....(1)$

ここで、2は雷道を線電荷とみなした場合の単位長あた りの電荷密度、r は落雷位置と測定地点の距離とする。理 論的には2と雷電流値 I は比例関係にあるので、レールや ケーブルに発生する雷過電圧 Vは、I に比例し、落雷位置 までの距離 r に反比例する。そこで本研究では、発生した 雷過電圧と I/r の相関を求めることとした。

また, *I*および*r*はJLDN(Japanese Lightning Detection Network)による落雷位置標定データに基づく。図 4 はJLDN により得られた落雷位置の一例である。図 4 には表れていないが,落雷位置標定データでは落雷位置の他に, 雷電流値と GPS 時計による落雷時刻が得られる。落雷時刻と,雷過電圧の発生時刻を照合し,雷過電圧を発生させた落雷の特定を行った。なお,JLDNによって捕捉できる 雷は,夏季雷で 80%強程度と言われている。また,標定誤 差も 1km 程度あると言われている。雷電流値(推定電流 値)誤差も定量的には評価されていないが,存在する⁴。

4. 試験結果

4.1 試験期間中の落雷について

試験期間中,測定地点より10km以内の領域において, 2112個のストローク,約1000回のフラッシュが発生した。 通常,1回のフラッシュは複数個のストロークによって形 成される。なお,本論文では1回のフラッシュを1回の落 雷として扱う。試験期間中に発生した落雷の内,222回の 落雷に対して,測定地点においてトリガレベル以上の雷過 電圧が観測された。測定地点から落雷位置までの距離と雷 電流値の絶対値をパラメータとして,トリガレベル以上の 雷過電圧を発生させた落雷を〇で,発生させなかった落雷 を×でプロットしたものを図5に示す。図5より,測定地 点と落雷位置との距離が近いほど,また,雷電流値が大き いほど,トリガレベル以上の雷過電圧が発生しやすい傾向 が見て取れる。







図5 トリガレベル以上の雷過電圧を発生させた落雷 条件(雷電流,落雷位置までの距離)

4.2 測定された雷過電圧について

試験期間中に SEE・SL ケーブルの芯線,レール,電源線 に発生した雷過電圧波形の一例を図6に示す。この雷過電 圧波形は2011年6月29日の19時9分54秒に発生した 落雷により記録されたものである。なお,雷電流値は -22kA,測定地点との距離は3.193kmであった。落雷位置









図6 測定された雷過電圧波形の例

を図7に示す。発生した雷過電圧の絶対値の最大値が、ケ ーブルおよびレールでは 0.10~0.16kV 程度であるのに対 し、電源線では2kVを上回っていることがわかる。

試験条件1の期間中において、SEE・SL ケーブルの芯線, レール,電源線に発生した雷過電圧の絶対値を縦軸とし, その雷過電圧を発生させたフラッシュの *Ih*・を横軸として, プロットしたものを図8に示す。なお、SEE・SL ケーブル の芯線、シールド、SVV ケーブルの芯線に発生する雷過電 圧の傾向に差異がなかったことから、ケーブルに発生する 雷過電圧の代表例として、SEE・SL ケーブルの芯線につい て示している。また、レール、電源線については、試験条 件1と2で差異がないと考えられるため、試験条件2の期 間中に発生した雷過電圧も合わせてプロットしている。

図中には、*Iとr*から、信号設備が接続されるレール、 ケーブル、そして電源線(架空線)に発生する雷過電圧を 推定できる式も示している。なお、発生雷過電圧のプロッ トの内、97%の発生雷過電圧の値を上回るように推定式を 設定した。残る 3%を除外した理由としては、前述のよう にJLDNによって得られる*Iやr*に誤差が存在すること、 今回の分析では雷電流の波形(立ち上がりが急峻な程、発 生雷過電圧が大きくなる)は考慮していないこと、また、*r* に関して、落雷位置と測定地点との距離に着目し、落雷位 置と線路との距離は考慮していないこと等から、*I/r*を指標 とした発生雷過電圧にもバラツキが生じることを配慮した ことによる。

図 8 に示した推定式を用い,例えば, 雷保護レベルが 10kV の信号設備を仮定し, それが SEE-SL ケーブルに接 続されているものと想定する。SEE-SL ケーブルの芯線に 対する推定式によると, SEE-SL ケーブルの芯線に発生す る雷過電圧が 10kV に達する *I*/r は 890kA/km とわかる。 よって, 雷電流値 31kA (雷電流値の累積頻度分布





図8 試験条件1の期間中に発生した雷過電圧

50%値⁵⁾の雷が,信号設備から35m以内に落ちた場合, Ihrの値が890kA/km以上となり,信号設備の雷保護レベルを超える雷過電圧が発生して,雷害に至る可能性がある と言える。

また,架空の電源線に信号設備が接続されていることを 想定する。図8の電源線の推定式を用いて計算を行うと, 発生雷過電圧が10kVに達する*L/r*は69kA/kmであり,雷 電流値31kAの雷が信号設備から450m以内の場所に落ち た場合に雷害に至る可能性があることがわかる。

今回の測定結果では、地上に敷設した線と架空線に発生 する雷過電圧について、明確な差異が認められた。架空線 に発生する雷過電圧は、地上敷設の線やレールに発生する 雷過電圧のおよそ 10 倍におよぶことが図 8 より見て取れ る。これは、地上に敷設した線よりも架空線の方が、放射 電磁界の誘導を受けやすく、発生する雷過電圧が大きくな ったものと推測される。そのため、より小さい雷電流値、 離れた距離の落雷によっても、雷害に至る可能性があると 言える。

一方,試験条件1と試験条件2において,SEE・SLケー ブルの芯線に発生した雷過電圧を比較したものを図9に示 す。今回の測定結果では,SEE・SLケーブルの芯線に発生 した雷過電圧に関して,試験条件2(シールドの非接地) よりも試験条件1(シールドの片端接地)の方が高い傾向 であった。これは,接地を行った場合には,落雷に伴い上 昇した大地電位の影響を受けたと推測される。

5. まとめ

実際の落雷時に、地上敷設のケーブルやレール、架空敷 設の電源線に発生する雷過電圧と落雷条件(雷電流,落雷 位置)との相関関係の把握を行い、落雷条件に応じた発生 雷過電圧の推定を行った。また、同じ落雷条件においても、 架空線には地上に敷設した線よりも 10 倍程度の高い雷過 電圧が発生することを確認した。一方、今回の測定では、



図 9 SEE-SL ケーブルのシールドの接地条件による
発生雷過電圧の比較

SEE-SL ケーブルのシールドを片端接地した場合の方が, 両端開放した場合よりも発生雷過電圧が高くなる傾向にあったが,これについてはデータの蓄積によるさらなる検証 が必要と考える。

今後は、落雷位置と線路までの距離に着目したデータの 分析を行うとともに、信号設備が雷害に至る落雷の発生頻 度の推定による雷リスク評価の検討を行う予定である。

参考文献

- 小野雄人,藤田浩由,新井英樹,山崎広達:鉄道信号設備における雷過電圧発生メカニズムの基礎的検討,平成 23 年電気学会全国大会,第5分冊, p.105, 2011
- 小野雄人,藤田浩由,新井英樹,山崎広達:信号設備に 発生する雷過電圧と落雷条件との相関,平成23年電気 学会産業応用部門,pp.[III-481]-[III-482],2011
- 3) 宮原恒昱: 電磁気学入門, p.34, 2002
- 4)電力設備のための電パラメータ選定方法調査専門委員会:電力設備のための電パラメータの選定法電磁気学入門,電気学会技術報告 No.1033, pp.18-27, 2005
- 5) 社団法人電気設備学会: 雷と高度情報化社会, p.11, 1999