

雷撃による電痕に関する理論検討

防食・補修工法研究会 柏木達夫

1. はじめに

我々は隅々にまで張りめぐらされた通信網や、簡易で便利な通信機器などが溢れる現代社会に於いて、利便性を当たり前の様に感じ、日々の暮らしを満喫・謳歌している。しかし、大地震や強大な台風などが勃発すると、これほど便利なものが壊滅的な被害を受け、日々の暮らしに支障がもたらされることになる。この時ほどインフラ設備等が必要不可欠なものであることを実感させられる事はない。これらのインフラ設備に、同様な被害をもたらすものとして雷撃が掲げられる。

雷撃による被害の代表としては、インフラ設備である通信回線の不通や破壊および送電線の被害による電力供給の停止事故などが広く世に知らしめられている。ところが、同じインフラ設備の一つである流体を輸送する埋設パイプラインの被害の実態は、あまり知られていないのが現状である。

そこで、これらの被害の元凶とされている雷サージやストリーマと言った現象に触れるとともに、これらの現象がもたらす埋設パイプラインへの悪影響の大きさを実感し、理解して頂くため計算を主体とした理論的な考察を加えてみることにした。

実測データを解析する手法がベストであるが、雷撃を発生させて実測することは、現実には非常に困難であるため、雷撃による電流の大きさとその継続時間を世の中に広く流布している値から選定し、それらの値の積である電気量(C:クーロン)を算定することにより、このエネルギー量で溶出する鉄鋼の体積および埋設パイプラインの管厚値の減少度合いについて検討を行った。

尚、鉄鋼の溶出現象により生じる電痕の大きさは、その立体形状により種々の値をとるものと考えられる。そこで、検討する電痕の形状として半球、円錐、半球体および半楕円球という代表的な形状4種を選定し、その溶出体積等について電気化学的な観点から理論的な検討を加えた。以下に検討経緯の詳細を報告する。

2. 検討方法

2. 1 雷撃について

雷撃とは、上空に発生した雷雲の底部に生じた負電荷と地上の正電荷との間に生じる巨大な放電現象であり、これにより発生する過渡的な異常大電圧と異常大電流を雷サージと呼んでいる。この雷サージは形成される経路により以下の二つに分類される。

埋設パイプライン関連設備への雷撃後、その関連設備を介して埋設パイプラインに直接侵入するものが直撃雷サージである。また、パイプライン近傍施設への誘導雷により大地にストリーマ(電子と正イオンがほぼ同じ密度で分布している導電性の放電路)が生じ、この現象により周辺大地を介して侵入するものを誘導雷サージと呼ぶ。

2. 2 雷撃の溶出エネルギー

雷撃の溶出エネルギーの大きさは、雷の継続時間と電流の積で判断される。その電流値は最大で 200kA 位と言われ、継続時間については最大で 0.1 秒程度とされている。これらの値に基づき、安全率を考慮し、大きめの値を各々3種類ずつ選定し、これらを掛け合わせた溶出エネルギー量の計算結果を表 1 に示す。これらの結果から雷撃電気量として 10^4 、 5×10^4 および 10^5 C の値を検討に適用する。

表 1 雷撃による電気量

雷撃電気量(C)		雷撃電流(A)		
		2×10^4	10^5	2×10^5
継続時間 (s)	5×10^{-4}	10	5×10	10^2
	5×10^{-2}	10^3	5×10^3	10^4
	5×10^{-1}	10^4	5×10^4	10^5

2. 3 検討に適用する数値

鉄鋼の溶出に関する数値については、諸々の値が使用されているが、今回の検討には表 2 に示す値を適用する。

表 2 鉄鋼の溶出に関する定数値

項目	単位	値
分子量	—	55.85
原子価	—	2
密度	g/cm ³	7.86
電気量	C	96485
溶出質量	g	27.9
溶出体積	cm ³	3.55
鋼管肉厚	mm	7.9 / 9.5 / 12.7

2. 4 電痕の形状と溶出体積

埋設パイプラインの穿孔の有無は、雷撃による理論的な電気量の大きさに左右されるが、溶出に伴い生じる種々の電痕の形状も寄与する。

そこで、数多くの形状の中から、生じ易いとされている半球、円錐、半球体および半楕円球の 4

種類に半楕円球の変形である回転楕円体を加え、これらを 3 次元モデルとして検討する。

まず、各々の 3 次元モデルの上面の長径を a、短径を b および深さ方向の径を c と定義し、モデル各々の溶出体積を算定した。それらの結果を整理したものを表 3 に示す。また、これら 3 次元モデルの概観を図 1 に示す。

表 3 電痕形状による溶出体積

電痕形状	電痕口径条件		溶出体積 V
半球	長径 a 短径 b 深さ c	a=b=c	$2\pi a^3/3$
円錐		a=b≠c	$\pi a^2 c/3$
半球体		a=b≠c	$\pi(c^3+3a^2c)/6$
半楕円球		a≠b≠c	$2\pi abc/3$
回転楕円体		a=b≠c	$2\pi a^2 c/3$

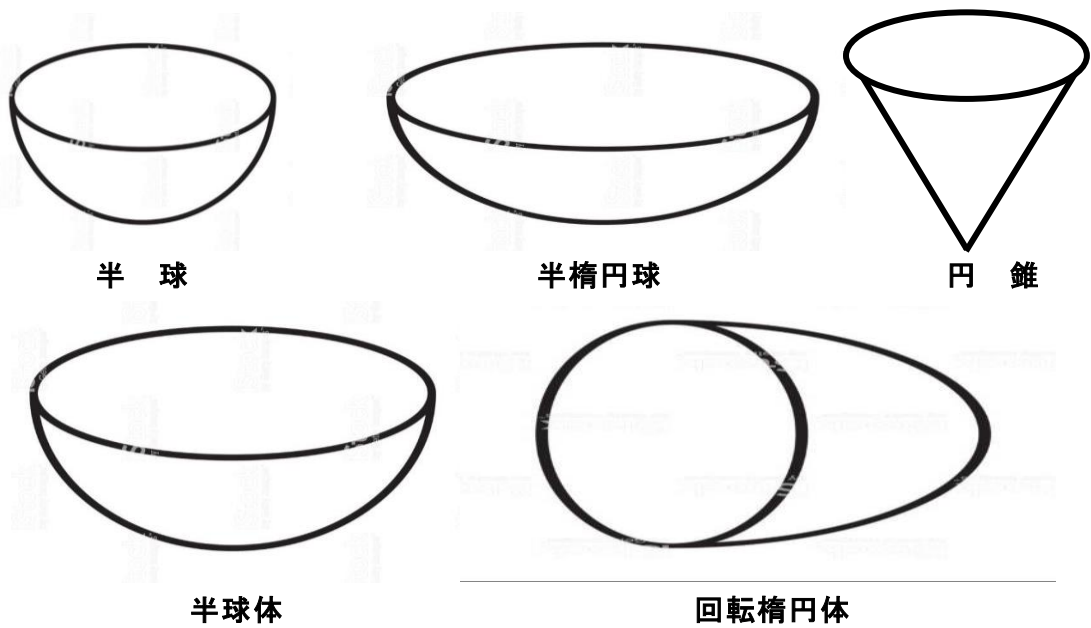


図1 3次元モデル形状

3. 検討結果と考察

まず、3種類の雷撃電気量による鋼管への穿孔の有無についての判別を全ての3次元モデルで行った。次に、穿孔が生じた場合を仮定し、その場合の口径の大きさを算定した。最後に、3次元モデルの長径と短径を変化させ、各々の形状の穿孔深さを計算することにより理論的な解析を試みた。

3.1 雷撃電気量により生じる穿孔の有無

電痕の形状に応じて長径と短径を肉厚の数倍と仮定し、溶出体積を算定した。この値と雷撃による溶出量を比較し、穿孔の有無を推定した。それらの結果を表4に示す。雷撃電気量が最大の 10^5C では、殆どの場合に穿孔が生じるが、回転楕円体の口径が肉厚の2倍の大きさになると穿孔は全く生じていない。

表4 電気量と電痕形状の穿孔の有無

電痕形状	電痕口径	鋼管肉厚 (cm)	溶出 体積 $V(\text{cm}^3)$	雷撃電気量(C)と溶出体積(cm^3)		
				10^4	5×10^4	10^5
				0.37	1.84	3.68
半球	$a=b=c$	0.79	1.03	○	穿孔	穿孔
		0.95	1.80	○	穿孔	穿孔
		1.27	4.29	○	○	○
円錐	$a=b=c/2$	0.79	0.13	穿孔	穿孔	穿孔
		0.95	0.22	穿孔	穿孔	穿孔
		1.27	0.54	○	穿孔	穿孔
	$a=b=2c$	0.79	2.07	○	○	穿孔
		0.95	3.59	○	○	穿孔
		1.27	8.58	○	○	○

半球体	a=b=3c/2	0.79	2.00	○	○	穿孔
		0.95	3.48	○	○	穿孔
		1.27	8.31	○	○	○
半楕円球	a=2c b=c	0.79	2.07	○	○	穿孔
		0.95	3.59	○	○	穿孔
		1.27	8.58	○	○	○
	a=c b=c/2	0.79	0.52	○	穿孔	穿孔
		0.95	0.90	○	穿孔	穿孔
		1.27	2.15	○	○	穿孔
回転楕円体	a= b=2c	0.79	4.13	○	○	○
		0.95	7.18	○	○	○
		1.27	17.16	○	○	○
	a=b=c/2	0.79	0.26	穿孔	穿孔	穿孔
		0.95	0.45	穿孔	穿孔	穿孔
		1.27	1.07	穿孔	穿孔	穿孔

3. 2 穿孔時の口径の推定

全モデルに対し、3種類の雷撃電気量に応じて穿孔が生じた場合を想定し、形成されると考えられる形状モデルの口径の大きさを鋼管3種類の肉厚ごとに推定計算した。尚、計算時には、半楕円球の長径は短径の2倍という一般的な条件を仮定した。それらの結果を表5および図2に示す。

半楕円球の推定口径が最も大きく、円錐が続き、半球と回転楕円体では電気量 $5 \times 10^4 \text{C}$ に於いて逆転現象がみられるものの、ほぼ同じ値で漸増している。半球の場合は、3方向の口径が全て等しいため、鋼管の肉厚に関係なく同じ値になる。尚、半球体が形成される条件として、口径が肉厚より大きくなければならず、この条件に適合しないものは値を記していない。

表5 全モデルの穿孔時の口径

電痕形状	肉厚(cm)	雷撃電気量 Q(C)		
		10^4	5×10^4	10^5
半球	0.79	0.56	0.96	1.21
	0.95	0.56	0.96	1.21
	1.27	0.56	0.96	1.21
円錐	0.79	0.67	1.49	2.11
	0.95	0.61	1.36	1.92
	1.27	0.53	1.18	1.66
半球体	0.79	—	1.13	1.66
	0.95	—	0.97	1.47
	1.27	—	—	—

半楕円球 $a=2b$	0.79	0.82	1.83	2.58
	0.95	0.75	1.67	2.36
	1.27	0.64	1.44	2.04
回転楕円体	0.79	0.47	1.05	1.49
	0.95	0.43	0.96	1.36
	1.27	0.37	0.83	1.18

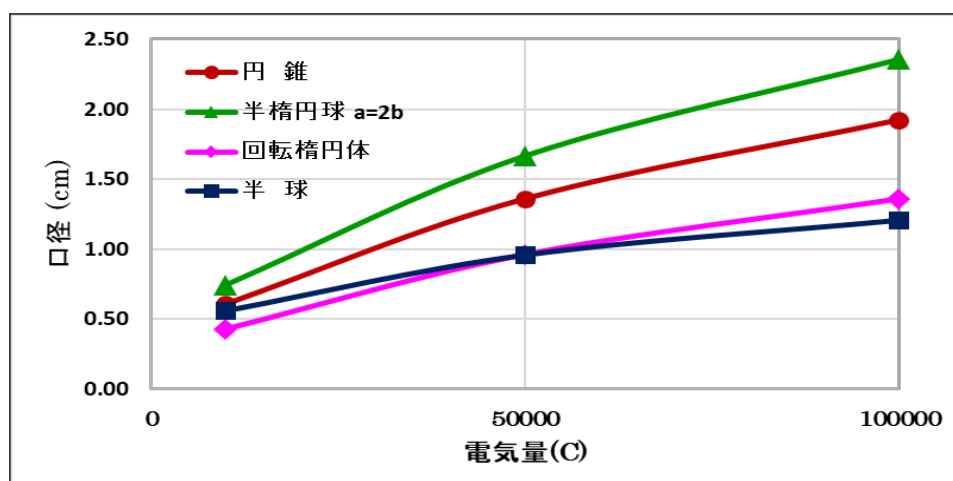


図2 全モデルの穿孔時の口径

3.3 口径条件に応じた穿孔深さの推定

5種類の形状モデルの口径条件を種々変化させることにより、全部で8ケースの口径条件を設定し、各々について雷撃電気量に応じた穿孔深さを算定した。それらの結果を表6および図3と図4に示す。口径条件をほぼ同様なものにした場合、推定穿孔深さは半球が最も大きく、半楕円球で最少となる。しかし、口径条件を変化させることにより様々な結果が輻轉するため、規則性を見出すことは困難である。

表6 口径条件による穿孔深さ

雷撃電気量(C)		10 ⁴	5×10 ⁴	10 ⁵	
溶出体積(cm ³)		0.37	1.84	3.68	
電痕形状	口径条件	穿孔深さ (cm)			
半球	$a=b=c$	$a=b=c$	0.56	0.96	1.21
円錐	$a=b \neq c$	$a=b=2c$	0.44	0.76	0.96
		$a=b=c/2$	1.12	1.92	2.41
半球体	$a=b \neq c$	$a=b=2c$	0.38	0.65	0.81
半楕円球	$a \neq b \neq c$	$a=4c \ b=2c$	0.28	0.48	0.60
		$a=c/2 \ b=c/3$	1.02	1.74	2.19
回転楕円体	$a=b \neq c$	$a=b=2c$	0.35	0.60	0.76
		$a=b=c/2$	0.89	1.52	1.92

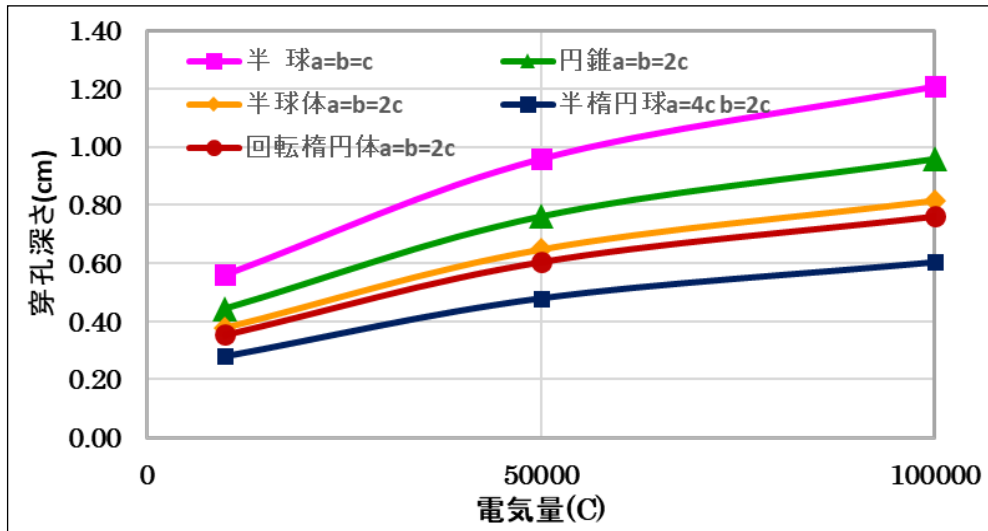


図3 全モデルの穿孔深さ

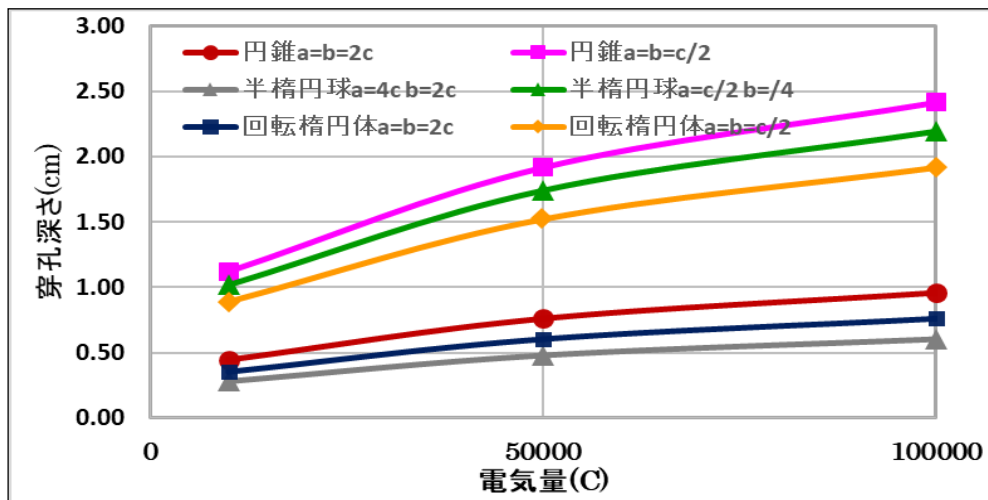


図4 2条件3モデルの穿孔深さ

3. 4 解析・検討結果のまとめ

今般実施した解析・検討により得られた知見を以下にまとめる。

- ①雷撃電気量が最大の 10^5C では、殆どの場合に穿孔が生じるが、回転楕円体の口径が肉厚の2倍の大きさになると、穿孔は全く生じていない。
- ②穿孔時の口径を推定すると、半楕円球が最も大きく、円錐が続き、半球と回転楕円体では電気量 5×10^4C に於いて逆転現象がみられるものの、ほぼ同じ値で漸増している。
- ③穿孔深さは、モデルごとの想定口径の大きさにより結果が輻輳するため、規則性を見出すことは困難である。

4. まとめ

あくまでも理論的な計算検討から得られた結果であり、実際の雷撃電流の大きさや継続時間および電痕形状などについても不明なことが多く、信頼度に欠ける点は否めないものの概要を把握することは出来た。これらの推定値から雷撃事故時に於ける被害の大きさが想定されるため、月並みな言い方ではあるが、常日頃から事故を想定し、状況によっては過剰とも思われる対策を施しておくことがベストであると考えます。