

接地電極の垂直断層近傍における特性に関する研究(2)

日大生産工(院) 片山敏幸
日大生産工 蒔田鐵夫 移川欣男

1. まえがき

様々な電気設備を施設する場合、保安用の接地を施すことが電気設備技術基準の解釈により義務付けられている。この接地にはそれぞれの目的に応じた規定の接地抵抗値があり、その値を得ることにより安全を確保している。しかし、接地を施す大地の条件は多様であり、規定の接地抵抗値を得ることが困難である場所が存在する。

そのため、接地抵抗値を減少させるだけではなく、歩幅接触電圧を緩和させることにより人体の四肢間に心室細動電流が流れることを防止する方法がある。その一つに主となる接地電極の周囲に地線を併用する方法がある。

また、接地が施される大地の構成は、一般に水平多層と仮定して接地設計が行われる。しかし、建築物の基礎および地中構造物を造るための掘削工事、あるいは河口付近に用地を造成するための埋め立て工事など、種々の工事が行われるため、大地は垂直多層構成となる。また、崖や沖合では自然発生的に垂直多層構成である。

この様にして、垂直多層構成となった大地においては、その大地抵抗率の比によって接地電極周囲の電位分布が水平多層構成の場合と大きく異なる。

本研究では、大地の断層近傍に埋設された電極の周囲で歩幅電圧が高くなる地点に着目し、これを安全値以内とするため、地表面上の電位傾度と電位分布から、直線状地線(以下、地線とだけ表記)の併用方法について検討した。

2. 電気映像法による計算原理と電位計算式

Fig.1 に電気映像の配置を示す。垂直断層の ρ_2 側に実像電極(Real)と対称な位置に反射係数 k を乗じた映像電極(Image1)を、G.L. を想定して空中に実像電極(Real)と映像電極(Image1)の映像電極(Image2, Image3)を考える。この様に配置すると、地中の任意の点 P の合計電位 V_t は、各電極による電位

(V_0, V_1, V_2, V_3)より(1)式で表される。

$$V_t = V_0 + V_1 + V_2 + V_3 \dots (1)$$

任意の点 P の電位 V は回転楕円体による電位計算式により(2)式で表される。ここでは大地抵抗率、 ℓ は電極の一要素の長さ、 I は流出電流、 x, y, z は直角座標系における任意の点の座標を示す。また、任意の点 P を P' とすることにより、電極自身の電位を求めることができる。

$$V = \frac{\rho I}{4\pi\ell} \ln \frac{x + \frac{\ell}{2} + \sqrt{y^2 + z^2 + \left(x + \frac{\ell}{2}\right)^2}}{x - \frac{\ell}{2} + \sqrt{y^2 + z^2 + \left(x - \frac{\ell}{2}\right)^2}} \dots (2)$$

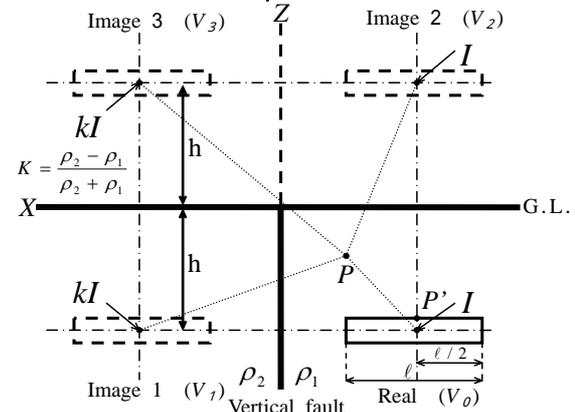


Fig.1 The concept of the image method.

3. 数値計算条件

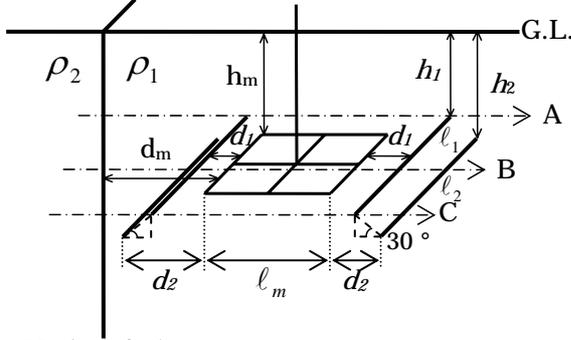
垂直断層の近傍に埋設された正方4メッシュ電極と併用した地線の状態を Fig.2 に示す。

正方4メッシュ電極は、一辺の長さ $\ell_m = 30\text{m}$ 、電極半径 $a = 0.0065\text{m}$ 、垂直断層からの距離 $d_m = 10\text{m}$ 、埋設深さ $h_m = 0.75\text{m}$ とした。垂直断層近傍の大地抵抗率においては ρ_1 を $100 \cdot \text{m}$ 一定とし、 ρ_2 を $\rho_1 < \rho_2$ の場合は $1 \times 10^6 \cdot \text{m}$ 、 $\rho_1 > \rho_2$ の場合は $1 \times 10^{-4} \cdot \text{m}$ とした。

地線については、主電極のみの時に電位傾度が急峻な側だけに併用するものとし、メッシュ電極との距離(以下、間隔とする)を1本目は d_1 、2本目は d_2 とし、それぞれの深さを h_1 、 h_2 とした。また、各地線の長さを

A Study on the Characteristics of Grounding Electrode
- Near the Vertical Fault -

l_1 、 l_2 とし、地線の上端部A、中心部B、下端部Cについて、電位傾度の緩和効果を検討した。但し、2本目の地線は、1本目に対し30°の角度で埋設した。また、メッシュ電極の位置に対し、垂直断層側を側、逆側を側とする。



Vertical fault
Fig.2 The model buried of mesh and counterpoise.

4. 電位傾度の検討

4.1 直線状地線を1本併用する場合

接地電極に地線を併用した時の電位傾度の最大値を Table 1、Table 2 に、地線の長さを変化させた時の電位傾度ならびに電位分布を Fig.3 ~ Fig.6 に例示する。

Table 1 より、 $l_1 > l_2$ の場合において、地線の併用間隔に対する電位傾度の最小値(図中の 内)は、間隔が広がる程その併用深さが深くなる。しかし、その中で最も小さい値は間隔が 3m、深さが 3mの時である。さらに、この時の地線の長さについて検討すると、電位傾度は Fig.3 に示す 32mのときでは緩和されているが、Fig.4 に示す 34mとなると逆に上昇している。

Table 2 より、 $l_1 < l_2$ の場合においては、電位傾度の最小値(内)は、間隔を変化させてもほぼ一定の埋設深さであり、間隔が 4.5m ~ 5mの付近では若干浅くなる。そして、このときの電位傾度の最小値の中では間隔が 3.5m、深さが 2.5mの時が最も小さい。また、

Table 1 Electrical potential gradient when used with a counterpoise($l_1 > l_2$).

The distance from the ground line [m]	The distance from Mesh electrode [m]									Mesh electrode only
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	
0.75	15.7177	15.5648	15.5544	15.6729	15.8988	16.2196	16.6324	17.1420	17.7715	13.4184
1	13.7080	13.4671	13.3776	13.4496	13.6182	13.8738	14.2152	14.6490	15.1899	
1.25	12.4200	12.1256	12.0189	12.0434	12.1670	12.3908	12.6961	13.0903	13.5680	
1.5	11.5455	11.1952	11.0615	11.0618	11.1725	11.3629	11.6459	12.0165	12.4936	
1.75	10.9076	10.5103	10.3525	10.3340	10.4280	10.6122	10.8735	11.2335	11.6949	
2	10.4424	9.9839	9.8063	9.7803	9.8608	10.0285	10.2850	10.6325	11.0873	
2.25	10.1235	9.5749	9.3719	9.3341	9.4065	9.5673	9.8154	10.1565	10.6076	
2.5	10.0586	9.2522	9.0202	8.9699	9.0325	9.1878	9.4315	9.7692	10.2171	
2.75	10.1410	9.2917	8.7290	8.6663	8.7216	8.8728	9.1113	9.4467	9.8938	
3	10.2576	9.5309	8.5764	8.4581	8.6036	8.8400	9.1733	9.6702		
3.25			9.0319	8.8436	8.7965	8.6690	9.0913	9.5474		
3.5							9.2270	9.4201		
3.75								9.5919		

$l_1 > l_2$ の場合と同様に地線の長さについても検討を行うと、電位傾度は Fig.5 に示す 34mでは緩和されているが、Fig.6 に示す 36mの長さとなると若干上昇する。

但し、一本目の地線を併用することにより、本来電位傾度の小さかった位置が急峻となる可能性がある。次節ではこれにより急峻となった電位傾度を緩和するために、2本目の地線の併用について検討する。

Table 2 Electrical potential gradient when used with a counterpoise($l_1 < l_2$).

The distance from the ground line [m]	The distance from Mesh electrode [m]									Mesh electrode only
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	
0.75	9.0770	8.7845	8.5724	8.4257	8.3253	8.2572	8.2119	8.1813	8.1664	8.14897
1	7.8170	7.4941	7.2553	7.0882	6.9750	6.8903	6.8264	6.7779	6.7411	
1.25	7.0067	6.6580	6.4115	6.2441	6.1161	6.0164	5.9394	5.8817	5.8350	
1.5	6.4417	6.0712	5.8191	5.6445	5.5085	5.4078	5.3269	5.2599	5.2039	
1.75	6.0310	5.6348	5.3766	5.1957	5.0573	4.9521	4.8652	4.7928	4.7348	
2	5.7332	5.3000	5.0390	4.8457	4.7041	4.5953	4.5045	4.4316	4.3693	
2.25	5.5495	5.0408	4.7571	4.5634	4.4197	4.3077	4.2147	4.2091	4.3657	
2.5	5.5325	4.8816	4.5339	4.3338	4.1859	4.0809	4.1721	4.2932	4.4276	
2.75	5.5698	5.0260	4.6015	4.3480	4.2304	4.2271	4.2878	4.3830	4.4964	
3	5.6176	5.1472	4.7785	4.5330	4.4017	4.3683	4.4036	4.4759	4.5700	

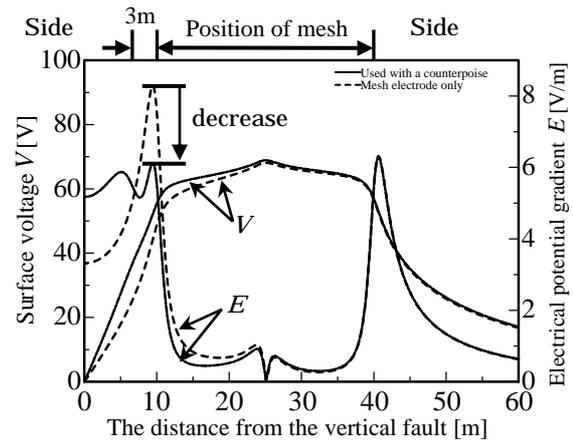


Fig.3 Abatement method of the electrical potential gradient by the counterpoise($l_1 > l_2$).

(Where, $d_1=3m$, $h_1=3m$, $l_1=32m$)

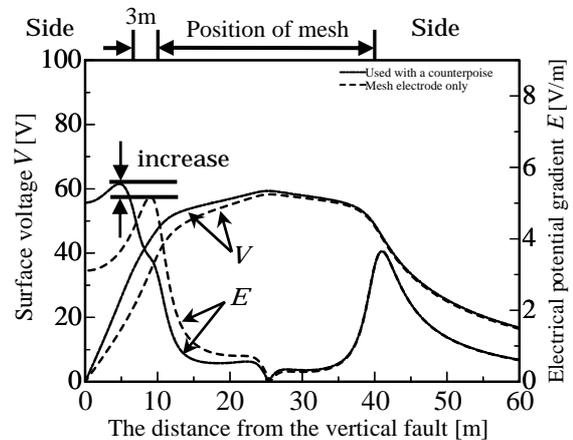


Fig.4 Abatement method of the electrical potential gradient by the counterpoise($l_1 > l_2$).

(Where, $d_1=3m$, $h_1=3m$, $l_1=34m$)

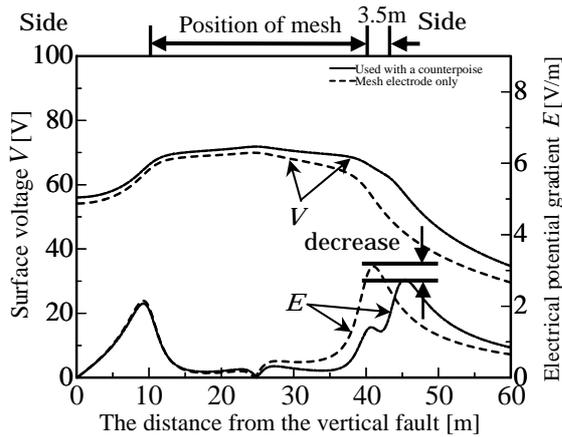


Fig.5 Abatement method of the electrical potential gradient by the counterpoise ($\rho_1 < \rho_2$).
(Where, $d_1=3.5\text{m}$, $h_1=2.5\text{m}$, $l_1=34\text{m}$)

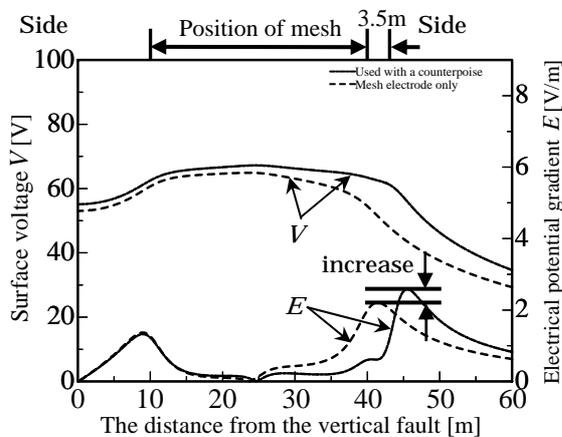


Fig.6 Abatement method of the electrical potential gradient by the counterpoise ($\rho_1 < \rho_2$).
(Where, $d_1=3.5\text{m}$, $h_1=2.5\text{m}$, $l_1=36\text{m}$)

4.2 直線状地線を2本併用する場合

前節で明らかにした併用条件を元に2本目の地線を併用した場合の電位傾度の最大値をTable 3に、地線の長さを変化させた時の電位傾度をFig.7、Fig.8に例示する。

Table 3より $\rho_1 > \rho_2$ の場合、電位傾度は地線1本併用時に比べて、2本併用時では逆に急峻となる。よって、この場合は2本目の地線を併用する必要は無い。また、 $\rho_1 < \rho_2$ の場合では、間隔8m、深さ5.1mの時に電位傾度が最小値となり、併用効果が得られる。

4.1節と同様に併用する2本目の地線の長さについて検討を行うと、電位傾度はFig.7に示すように長さが38mのときでは減少しているが、Fig.8で示すように40mとなると増加している。これらより、併用する2本目の地線の長さは一本目より長くなるといえる。

以上の様にして得られた結果を用いて、次節では現実規模の故障電流を想定した場合についての検討を行った。

Table 3 Electrical potential gradient when used with two counterpoises.

Condition of the ground	The distance from Mesh electrode [m]	The distance from the ground line [m]	Electrical potential gradient [V/m]	
			In case of used with two counterpoises	In case of used with a counterpoise
$\rho_1 > \rho_2$	3.5	3.3	9.7595	8.4581
	4.0	3.6	10.0447	
	7.5	4.8	2.8698	
$\rho_1 < \rho_2$	8.0	5.1	2.7244	4.0809
	8.5	5.4	2.7548	

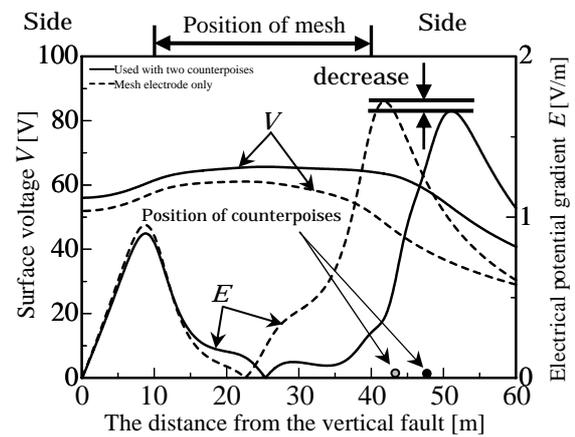


Fig.7 Abatement method of the electrical potential gradient by the counterpoise ($\rho_1 < \rho_2$).
(Where, $d_1=3.5\text{m}$, $h_1=2.5\text{m}$, $l_1=34\text{m}$, $d_2=8\text{m}$, $h_2=5.1\text{m}$, $l_2=38\text{m}$)

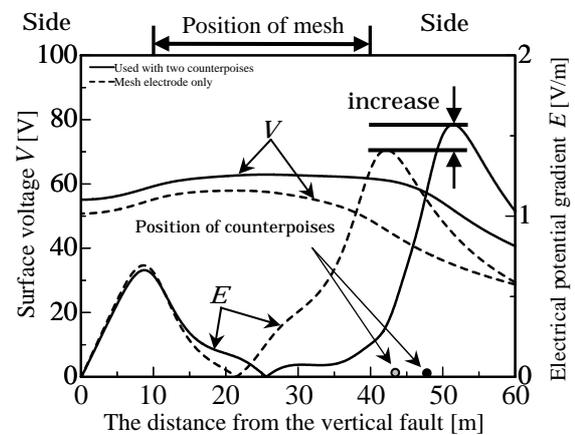


Fig.8 Abatement method of the electrical potential gradient by the counterpoise ($\rho_1 < \rho_2$).
(Where, $d_1=3.5\text{m}$, $h_1=2.5\text{m}$, $l_1=34\text{m}$, $d_2=8\text{m}$, $h_2=5.1\text{m}$, $l_2=40\text{m}$)

4.3 現実規模における検討

4.1並びに4.2節で明らかにした主電極に対する地線の最適な併用条件において、故障電流が流入した際の電位分布と電位傾度をFig.9、Fig.10に例示する。

Fig.9に示す $\rho_1 > \rho_2$ の場合、地線を1本併用することで電位傾度が約36%減少する。一方、Fig.10に示す $\rho_1 < \rho_2$ の場合、地線を1本併用すると電位傾度が約46%減少し、2本目を併用すると66%程度減少する。但し、

地線を併用した側とは逆側の電位傾度の緩和効果については大きくはない。

地線を併用した側における故障電流増大時の電位傾度の最大値を Fig.11 に示す。ここでは、危険となる歩幅電圧の算出に関し、次のように仮定する。人の歩幅を 1m とし、人体抵抗を 500 Ω、片足と大地との接触抵抗は最悪な状態（素足で皮膚表面が著しく濡れている状態）を想定して 500 Ω、人体電流許容値を 0.116A（1 秒間の場合）として計算し、危険となる歩幅電圧を 174V/m とする。

Fig.11 より、174V/m となる故障電流の値は、 $\rho_1 < \rho_2$ の場合には、地線 1 本の併用で主電極のみの状態より約 1.8 倍、2 本併用では 3 倍程度まで上昇する。 $\rho_1 > \rho_2$ の場合には、地線 1 本の併用で主電極のみの状態より 1.6 倍程度まで対応できる。

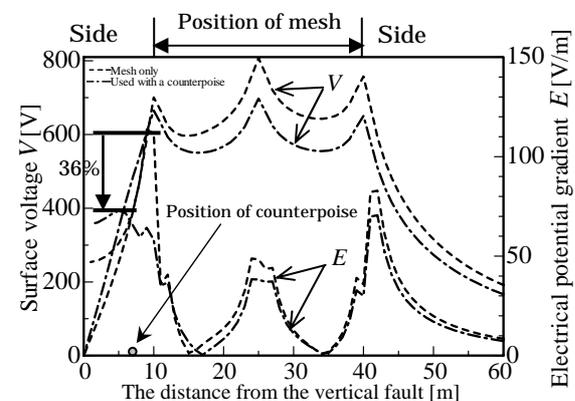


Fig.9 Abatement method of the Electrical potential gradient by the counterpoise ($I_g=700A$, $\rho_1 > \rho_2$). (Where, $d_1=3m$, $h_1=3m$, $\ell_1=32m$)

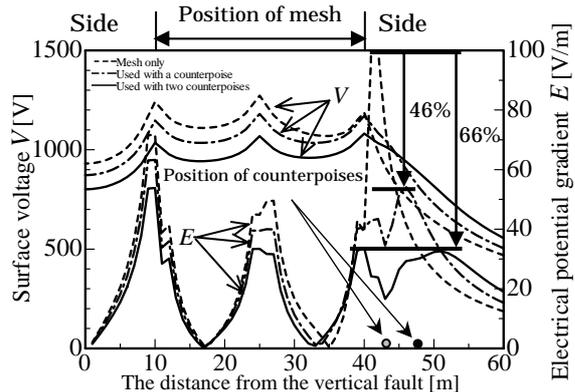


Fig.10 Abatement method of the Electrical potential gradient by the counterpoise ($I_g=700A$, $\rho_1 < \rho_2$). (Where, $d_1=3.5m$, $h_1=2.5m$, $\ell_1=34m$, $d_2=8m$, $h_2=5.1m$, $\ell_2=38m$)

5. あとがき

電位傾度を緩和するために、直線状地線を併用した場合の検討を行った。結果を要約すると、以下の通りである。

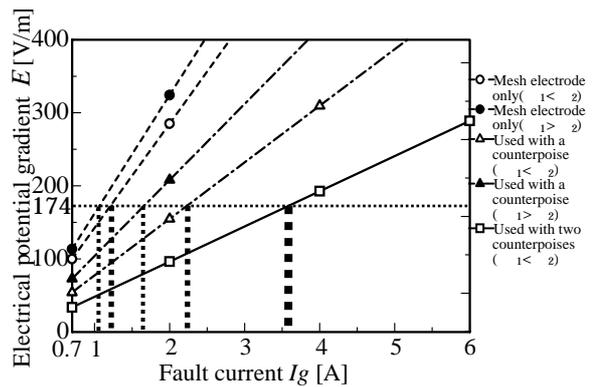


Fig.11 Maximum value of Electrical potential gradient in the Fault current.

(1) 電位傾度を緩和したい地点のみに着目し、地線を 1 本併用するだけでも、緩和効果は十分にある。このとき、地線の最適な併用条件は $\rho_1 > \rho_2$ の場合にはメッシュ電極と地線の間隔が 3m、埋設深さが 3m、地線の長さは 32m であり、 $\rho_1 < \rho_2$ の場合にはメッシュ電極と地線の間隔が 3.5m、埋設深さが 2.5m、地線の長さが 34m である。また、併用する地線の最適な埋設位置は主電極に対し、角度が 30~45° の範囲に入っている。

(2) 1 本目は最適な埋設条件とし、2 本目を 1 本目に対し 30° の角度で併用した場合、 $\rho_1 < \rho_2$ では主電極と地線の間隔は 8m、埋設深さは 5.1m、地線の長さは 38m で併用し、 $\rho_1 > \rho_2$ では併用する必要はない。

(3) 現実規模においても主電極に地線を併用することにより、危険となる歩幅電圧となる故障電流の値は、 $\rho_1 > \rho_2$ の場合には 1 本併用で約 1.6 倍、 $\rho_1 < \rho_2$ の場合には 1 本併用で 1.8 倍、2 本では 3 倍程度まで上昇する。

本研究により、電位傾度を緩和するための直線状地線の最適な併用方法を明らかにした。

しかし、地線を併用した側とは逆側の電位傾度はほとんど緩和されないため、そちら側の電位傾度が危険となる歩幅電圧値を超えるような場合、同様に地線を併用するか環状地線を併用する必要がある。

また、主電極の形状が変化した場合、電位傾度を緩和するために併用する地線は垂直断層近傍において変化すると考えられる。これらは今後の検討課題となる。

参考文献

- 1) 鈴木・蒔田・移川：垂直断層を有する大地中に埋設された接地電極の特性に関する研究、平成 16 年度修士論文
- 2) 川瀬 太郎著：地絡保護と接地技術、オーム社(1977)