

改善雷电压冲击土体中电压降分布模拟试验

饶平平¹, 刘 洋¹, 刘 彬²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 浙江建设职业技术学院 建筑工程系, 杭州 311231)

摘要: 对接地体在不同含水率土体中进行雷电压冲击特性模拟试验, 分析不同含水率土体对应的冲击电压响应波形特征, 得到了不同含水率下的冲击电压降分布规律. 试验结果表明: 在单一含水率的土体中, 电压降呈现出两端多、中部少的分布规律, 其中输入端电压降最大; 随着土体含水率的增加, 输入端电压降比值减小. 根据试验结果, 提出了通过提高土体局部含水率以改善接地体冲击电压降分布规律的措施. 改善后的试验结果表明, 冲击电压下输入端土层含水率的提高能够明显改善电压降的分布, 主要表现在输入端电压降比值显著降低, 且输入端土层含水率越大, 效果越明显.

关键词: 冲击电压; 土体含水率; 电压降; 端部效应

中图分类号: TU 96 **文献标志码:** A

Simulation Test for Improving the Distribution of Voltage Drop in Soil Under the Action of Lightning Impulse

RAO Pingping¹, LIU Yang¹, LIU Bin²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Civil Engineering, Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China)

Abstract: A lightning impulse characteristic simulation test was carried out in the soil with different water contents. The waveform characteristics of shock response of the soil corresponding to different water contents were analyzed, and the distribution of impulse voltage drop under different water contents was obtained. The experimental results show that the distribution of the voltage drop is high at the both ends but low in the middle of the soil layer which is purely wetted with water. The voltage drop at input end is the highest, and the higher the water content, the lower the ratio of voltage drop. According to the experimental results, it is indicated that the distribution of impulse voltage drop can be improved by increasing the local water content. The improved test results show that the increasing water content of the soil layer at input end under the impulse voltage can improve the distribution of the voltage drop significantly. The main performance is the voltage drop at input end reduced greatly, and the water content of the soil layer at input end is higher, the effect is more obvious.

Keywords: impulse voltage; soil moisture; voltage drop; end effect

收稿日期: 2015-08-25

第一作者: 饶平平(1984-), 男, 副教授. 研究方向: 岩土力学及环境岩土工程研究. E-mail: raopingping@usst.edu.cn

雷电是一种静电放电现象,当雷云与大地之间的电场强度增加到一定时,就会在雷云与大地之间进行放电,即形成雷击^[1]. 雷电冲击电流通过接地装置向岩土体流散,接地装置的冲击特性决定建筑物的防雷保护效果,而接地装置的冲击特性与接地装置周围岩土体的雷电冲击特性密切相关,因此有必要对岩土体在大电流、高电压下的冲击特性进行研究. 已经开展的土体击穿特性试验侧重于研究土体的临界击穿场强^[2-4]和土体的电离对接地装置冲击接地性能的影响^[5-7],利用有限元分析法对土体动态电离的非线性问题进行模拟,得出电离区域沿接地体分布的不均匀性. 除了理论计算研究外,部分学者利用真型试验和模拟试验的方法研究冲击电流入地后地中电场的分布特性. 相关试验研究表明,接地体上冲击电流和电压的分布主要集中在接地体端部^[8-10],且通过改变接地体的结构和长度可以改善接地体冲击散流时的地中电场分布^[11-12],达到保护人身和电气设备的目的.

本文以上海地区典型软土为例,利用雷电冲击电压发生器以及自行设计的试验装置,对不同含水率土体进行雷电压冲击试验,研究不同含水率条件下土体冲击电压降分布规律. 并根据试验结果,从改善接地体冲击电压降分布规律角度进行了试验研究.

1 试验装置和试验方法

1.1 试验装置

在室内试验中,电压冲击试验装置为雷电冲击电压发生器,主要包括脉冲电容器、电压传感器、调波电阻、调波电感、铜球放电器、数字示波器以及控制操作平台. 其结构示意图如图1所示. 本次试验选择 $1.2/50\ \mu\text{s}$ 标准脉冲电压波形,输出开路电压最大峰值 15 kV,最大输出能量为 3 kJ. 土样模型盒采用有机钢化玻璃制作,尺寸为 $30\ \text{cm} \times 20\ \text{cm} \times 20\ \text{cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),如图2所示. 试验模型盒一端输入电压,另一端接地,在土盒一侧有5个金属接

口,各接口间距为 5 cm,通过这 5 个接口可测得离输入端不同距离处的输出电压值.

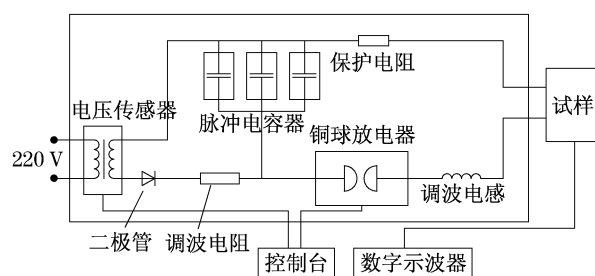


图1 雷电冲击电压发生器示意图

Fig.1 Schematic diagram of lightning impulse voltage generator

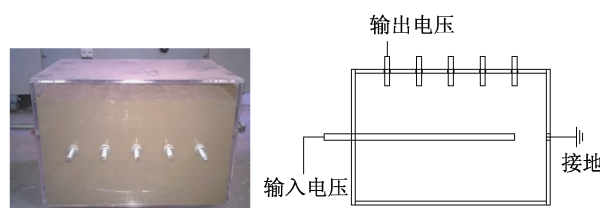


图2 试验土盒及示意图

Fig.2 Soil box for test and its schematic diagram

1.2 试验土样

试验土样取自上海外滩典型淤泥质粘土^[13],原状土的基本物理力学性质如表1所示. 试验土样运回试验室后,将土样烘干、碾碎、过筛,依次配置含水率为 10%,20%,30%.

1.3 试验方法

试验过程中,对土体进行雷电压冲击试验时,首先对冲击电压发生器的电容器组充电,充电结束后触发铜球间隙放电,使冲击电压流过试验土体内,通过电压传感器获取各个接口的电压波形,并通过电缆信号线输入数字示波器. 通过分析各接口输出电压峰值,得到冲击电压在土体中的电压降分布规律. 通过试验结果,分析影响分布规律的因素,并通过改变部分参数的方法来改善试验结果. 实测数据显示,雷电对大地放电多为负极性脉冲波^[14],故本文雷电冲击试验采用负极性电压,得到的电压值为负值.

表1 粘土物理力学性质

Tab.1 Physical and mechanical properties of clay

来源	孔隙比 e	含水率 $w/\%$	比重 G_s	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 I_p	粒度组成/ $\%$		
							$<0.002\ \text{mm}$	$0.002\sim0.005\ \text{mm}$	$0.005\sim0.25\ \text{mm}$
外滩	1.3	45.8	2.73	44.5	23.5	21.0	23.6	12.1	64.3

2 冲击电压降试验结果分析

试验测得土体含水率 10%, 20%, 30% 所对应的电阻率分别为 $66.7, 21.9, 5.3 \Omega \cdot \text{m}$, 即随着含水率的增大, 土体电阻率逐渐减小. 其原因在于随着含水率的逐渐增大, 土体渐趋饱和, 土体孔隙与土颗粒表面的电阻率小, 从而引起土体的电阻率也逐渐减小. 分别在土体含水率为 10%, 20%, 30% 的情况下, 进行水平接地体电压冲击特性的试验研究, 并考察冲击电压幅值变化 (8, 10, 15 kV) 对电压降分布的影响. 不同含水率的土体冲击电压响应曲线如图 3 所示. 再以每 5 cm 作为一个导体段, 将各导体段两端电压峰值之差除以总电压降做为各段导体的相对电压降比值, 其分布如图 4 所示.

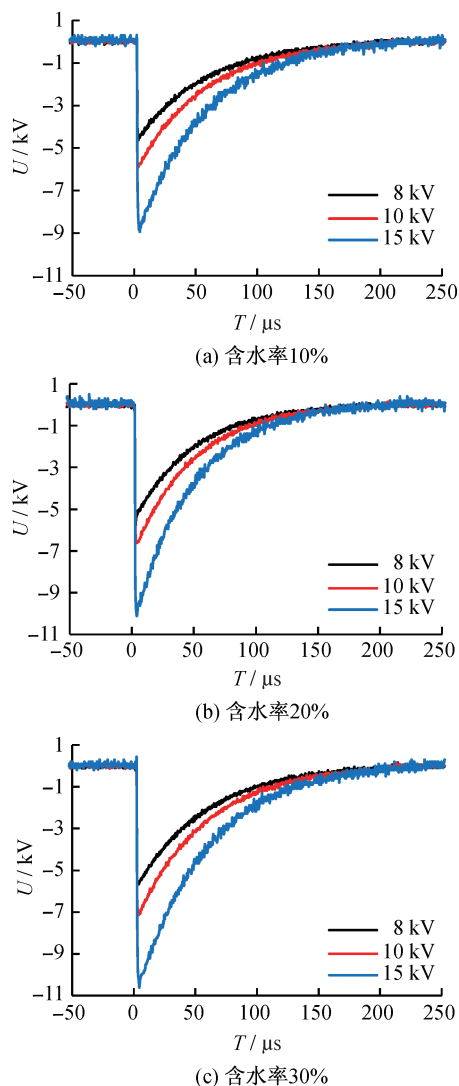


图 3 不同含水率的土体冲击电压响应曲线

Fig. 3 Voltage waveform of the soil with different moisture contents

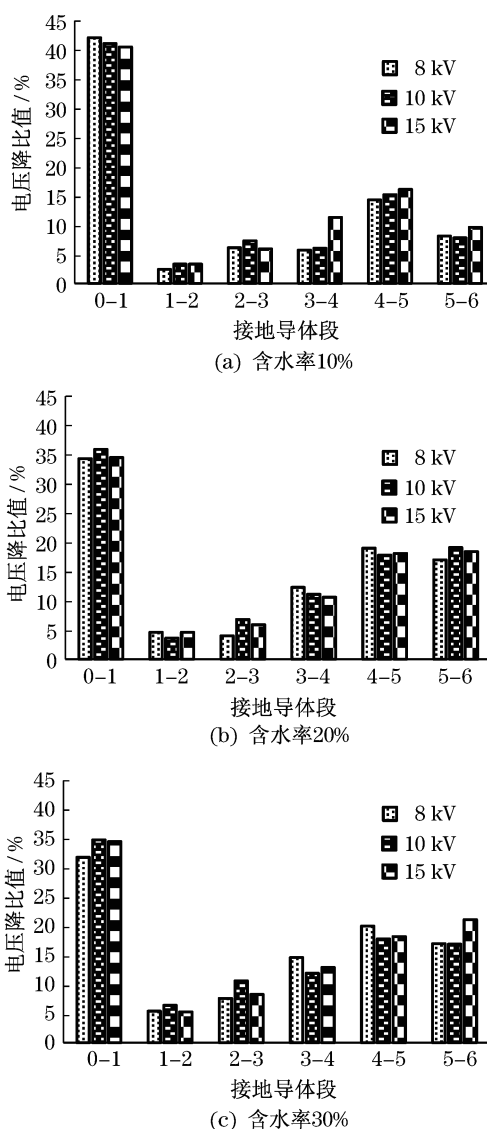


图 4 不同含水率的土体冲击电压降分布规律

Fig. 4 Distribution of impulse voltage drop in the soil with different moisture contents

由图 3 可以看出, 由于施加在土体上的冲击电压是时变函数, 土体响应电压也随之呈现时变特征, 冲击电压放电在很短的时间内电压上升到最大值, 电压消散时间接近 $250 \mu\text{s}$, 雷电冲击土体电压波形具有陡上升和缓下降的特征. 在土体含水率相同的情况下, 输入的电压值越高, 得到的电压波形的峰值越大. 在输入电压值相同的情况下, 对比分析不同含水率土体对应的冲击电压响应波形. 当输入电压为 8 kV 时, 土体含水率 10%, 20%, 30% 对应的峰值电压分别为 $-4.6, -5.7, -5.8 \text{ kV}$; 当输入电压为 10 kV 时, 土体含水率 10%, 20%, 30% 对应的峰值电压分别为 $-5.8, -6.6, -7.0 \text{ kV}$; 当输入电压为 15 kV 时, 土体含水率 10%, 20%, 30% 对应的峰值

电压分别为 -8.9 , -10.0 , -10.6 kV. 由此可见,在同一输入电压下,随着含水率的增大,输出电压波形峰值也增大. 这是因为土体是典型的多孔介质,一般来说,土体固相与气相成分属于非导电粒子. 当土体含水率不断增大时,土体颗粒表面逐渐形成连续的含水通道,电流通常沿着含水通道击穿,含水率越大的土体,电阻率越小,电压通过时的电压降也越小.

由图4可以看出,3种含水率的土体在冲击雷电压作用下沿接地体的电压降分布都是不均匀的,且靠近接地体电压输入端导体段电压降偏大,远离输入端也略大,呈现出明显的两端多、中间少的规律. 在图4(a)中,0-1段导体电压降比值接近45%;在图4(b)和图4(c)中,0-1段导体电压降比值为35%左右,这说明含水率越低,即土体电阻率越大,电压降分布的不均匀程度越严重. 由于相对低土体电阻率条件,冲击电压注入高土体电阻率时,电流不易通过土体,使得电压降低变大,从而导致高土体电阻率条件下接地体电压降分布比低土体电阻率条件下更不均匀. 对于同一种含水率土体,输入电压幅值变化对电压降分布影响不大,这可能是由于本次试验的输入电压均属于高电压范围.

值得注意的是,电压降沿接地体分布呈现明显的两端多、中间少的规律,但其分布情况并不对称,距离电压输入端较远端土体电压降远比输入端附近的电压降小,这种接地体的电压降不均匀分布大大降低了接地体的利用率,不利于保护人身和电气设备的安全.

3 土层含水率改变后的对比试验

为了使接地体在土体中的电压降分布均匀,本文使用改变土体局部土层含水率的方法来改变土体电阻率变化,试验土样为配置双层不同含水率的土体,其含水率组合分别为20%~10%和30%~10%,冲击电压分别为8,10,15 kV下进行试验.

图5所示为试验土样分布示意图,图中不同阴影代表不同含水率的土体. 左边部分的土体含水率为20%和30%,土层厚为7.5 cm;右边部分土体含水率为10%. 电压从左边即含水率高的一端输入,右端接地. 试验测得土样在各电压幅值下的波形图如图6所示,通过输出端口测得的各段导体电压幅值,计算分析后得到电压降分布,如图7所示(见下页).

由图6可以看出,两种组合的土样在输入电压为8,10,15 kV下的冲击电压峰值有较大的差距,其

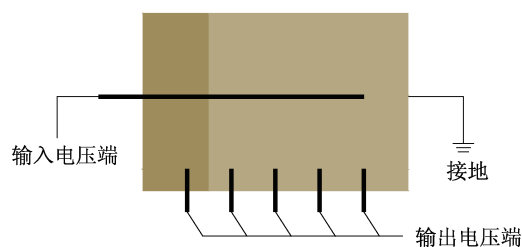
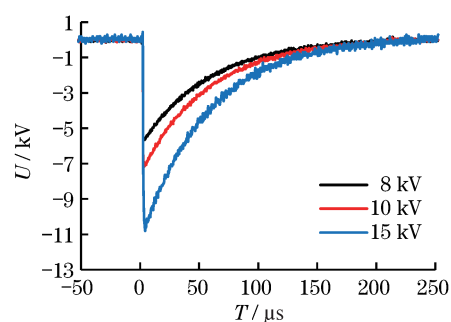
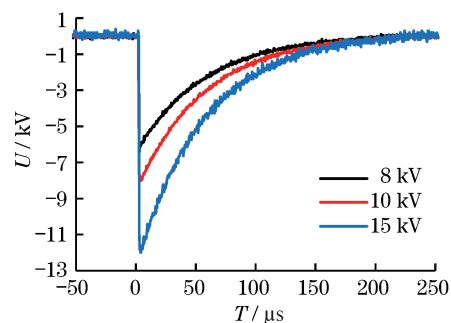


图5 不同含水率的土层分布示意图

Fig.5 Diagram of the soil layers with different moisture contents



(a) 含水率20%~10%



(b) 含水率30%~10%

图6 不同土层含水率的土体冲击电压响应曲线

Fig.6 Voltage waveform of the soil layers with different moisture contents

峰值分别为5.7, 7.1, 10.8 kV和6.4, 8.0, 11.9 kV. 由此可以看出,土体局部含水率改变对土体的雷电压冲击特性有一定的影响,相对于图3中的各数值,各电压幅值都有所增大. 这表明雷电压通过局部含水率提高的土体时,电压降较小,这是由于电压输入端土体含水率增大,电阻率降低,雷电压入地后,端部土体处电压降减小. 此外,降低局部土体电阻率,同样会降低整个土体的电阻率,从而雷电压通过土体试样后的电压降随之减小.

图7为不同土层含水率的土体冲击电压降分布规律. 由图7(a)可以看出,0-1段导体电压降比值约为30%,相对于图4,其电压降分布较为均匀. 因为电压输入端含水率的增加降低了端部的电阻率,

使得电压通过端部土体时的电压降减小,从而使冲击电压在接地体上的电压降分布趋于均匀.在图7(b)中,0-1段导体电压降比值为20%,且其分布规律明显比图7(a)均匀,这是由于进一步降低端部的电阻率,大大减小了雷电压在输入端土体的电压损耗,减小了电压降值,改善了电压降分布规律.

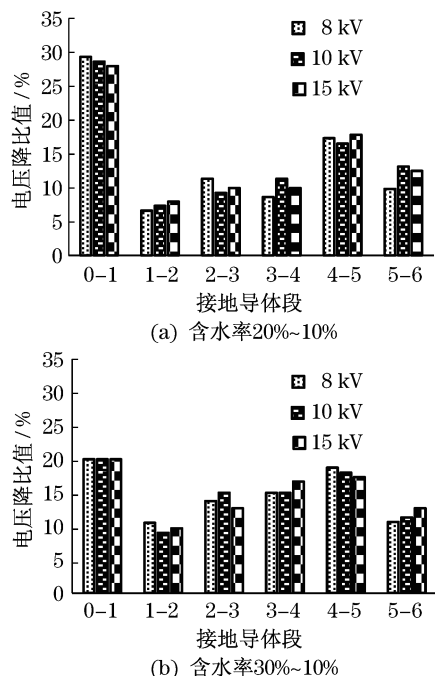


图7 不同土层含水率的土体冲击电压降分布规律

Fig.7 Distribution of impulse voltage drop in the soil layers with different moisture contents

4 结 论

利用雷电冲击电压发生器,对土体进行冲击电压模拟试验,分析了不同含水率土体的冲击电压降分布,并从改变接地体周围局部土体电阻率的角度来改善电压降分布规律,得到如下结论:

a. 土体电压波形具有陡上升和缓下降的特征,含水量越大,电阻率越小,冲击电压波形峰值也越大.

b. 在不同冲击电压作用下,土体在沿接地体方向上的电压降分布都是不均匀的,靠近接地体两端的土体电压降偏大,且在电压输入端的电压降占总电压降比值最大,这种分布规律随着土体电阻率的减小呈现得更明显.

c. 提高电压输入端的土体含水率能够改善接地体雷电压冲击时的电压降分布,并使其分布趋于均匀,提高了接地体的利用率,且注入端的含水率越高,改善的效果越明显.

参考文献:

- [1] 陈渭民. 雷电学原理[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2006.
- [2] 司马文霞, 李晓丽, 袁涛. 考虑土壤非线性特性的接地网冲击特性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 127-132.
- [3] MOUSA A M. The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1669-1677.
- [4] GAO Y Q, HE J L, ZOU J, et al. Fractal simulation of soil breakdown under lightning current[J]. Journal of Electrostatics, 2004, 61(3/4): 197-207.
- [5] LIU Y Q, THEETHAYI N, THOTTAPPILLIL R. An engineering model for transient analysis of grounding system under lightning strikes: non-uniform transmission-line approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 722-730.
- [6] ZENG R, GONG X H, HE J L, et al. Lightning impulse performances of grounding grids for substations considering soil ionization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 667-675.
- [7] HABJANIC A, TRLEP M. The simulation of the soil ionization phenomenon around the grounding system by the finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 867-870.
- [8] 司马文霞, 李晓丽, 袁涛, 等. 不同结构土壤中接地网冲击特性的测量与分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1342-1346.
- [9] 夏长征, 陈慈萱, 文习山. 伸长接地体上冲击电流和电压分布特性的研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(5): 24-25.
- [10] 朱时阳, 袁涛, 朱彬. 分层土壤中接地装置冲击散流特性的有限元分析模型[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2304-2309.
- [11] 李景丽, 蒋建东, 李丽丽. 针刺式接地装置降阻机制的仿真和试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 211-217.
- [12] 司马文霞, 雷超平, 袁涛, 等. 改善冲击散流时地中电场分布的接地降阻试验[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2294-2301.
- [13] 饶平平, 陈尚荣, 崔纪飞, 等. 黄浦区洛克外滩源深基坑监测研究[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(9): 227-233.
- [14] 束洪春, 张斌, 张广斌, 等. ± 800 kV 直流输电线路雷击干扰短时窗电压均值识别方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2180-2186.

(编辑: 董 伟)