

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2009.03.017

膨胀土裂隙电导特性

龚永康¹, 陈 亮¹, 武广繁²

(1.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098;2.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了解膨胀土裂隙发育时所对应的电导变化规律,在室内进行了 4 组模拟裂隙发育位置、长度、深度、数目变化下电导随之变化的试验,采用人工方法模拟裂隙的展开.试验结果表明:通过监测土体电导能够发现裂隙发育位置,裂隙间的电导值随裂隙的长度、深度、数目的增加而减小.

关键词:膨胀土;裂隙;电导;室内试验

中图分类号: TU411.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2009)03-0323-04

膨胀土是一种特殊性质土,具有“胀缩性、裂隙性和超固结性”的特征^[1-2].对于膨胀土边坡^[3],由于气候条件的变化,膨胀土反复吸水和失水,土体裂隙经历了“发育—闭合—再发育”的反复循环过程.膨胀土边坡中的裂隙发育一方面增加了土体的渗透通道,导致土体结构的湿化变形,使土体强度降低,另一方面裂隙的存在使沿裂隙面和滑动面的土体强度较完整的土体强度大大降低^[4].

关于膨胀土裂隙的研究,袁俊平等^[5]利用远距光学显微镜对膨胀土试样进行观测,发现利用裂隙图像的灰度熵能较好地表征裂隙的发育程度,实现了对膨胀土裂隙的定量分析;易顺民等^[6]依据分形理论研究了膨胀土裂隙结构的分形特征,指出膨胀土裂隙的力学效应特征同抗剪强度指标有很好的相关性;此外,压汞法、显微镜切片法、X 射线衍射法、扫描电镜法、超声波法也被用来研究膨胀土裂隙.但是,这些方法很难反映土体内部裂隙在无扰动情况下的真实分布.本文通过室内试验研究裂隙发育与电导之间的关系,提出了膨胀土裂隙研究的另一种思路.

1 膨胀土裂隙及土体导电性基本理论

1.1 膨胀土裂隙成因及工程影响

由 Griffith 理论,土体颗粒之间的孔隙可以看成是微裂隙,肉眼可见的宏观裂隙是这些微裂隙在荷载作用下开裂产生的.简化的毛细管模型说明基质吸力与土颗粒的直径成反比,即在相同含水量条件下,小粒径土体比大粒径土体产生的基质吸力要大.比较使土体产生开裂的拉应力和土体内部的基质吸力的大小,可以认为细粒径土体比粗粒径土体更容易开裂.这就是膨胀土等黏土经常开裂而砂土却很少开裂的原因^[7].此外,膨胀土的主要矿物成分为蒙脱石、伊利石等黏性颗粒,这些黏性颗粒特别是蒙脱石遇水膨胀,体积能增加数倍,具有很强的吸附力及阳离子交换性能,这导致了膨胀土胀缩性裂隙的产生.

膨胀土裂隙对土体的影响主要表现在:(a)在相同含水量的情况下,裂隙性膨胀土比同类非开裂的土体具有更高的压缩性和更大的渗透性;(b)裂隙的存在将削弱土体的抗剪强度;(c)气候干燥时,土体中的水分从地表及裂隙的侧壁缓慢蒸发,降雨时,雨水沿裂隙快速进入土体内部,这对边坡的稳定性具有重要影响.膨胀土边坡失稳主要是沿边坡土体内的裂隙面或层理结构面滑动,裂隙问题是膨胀土边坡稳定的关键问题,裂隙的发育大大降低了土体的强度,从而导致滑坡事故的发生^[7].

1.2 膨胀土的导电特性

土体一般是由土颗粒、水分、气体构成的三相体系,在非饱和土力学中,土体也被描述为四相体系,第四相即水、气的分界面或所谓的收缩膜.影响膨胀土导电特性的主要因素有 2 个:(a)土体颗粒性质.膨胀土的

矿物成分主要有蒙脱石、伊利石和高岭石等黏性颗粒,膨胀土的微观结构是面-面叠聚体^[8],通过同向置换、晶格缺陷及破键、选择性吸附、离解吸附等方式,黏土颗粒表面带有了一定的负电荷,在由此产生的静电引力作用下,水溶液中的阳离子吸附到黏粒的表面,而黏粒特别细小,具有很大的比表面积,能吸附很多的阳离子。土体导电特性与黏粒吸附阳离子数量有关,土体吸附阳离子的能力与土体的黏粒含量有关^[9]。(b)孔隙水。土中孔隙水的多寡影响了土体中导电路径的大小,这表现在土体含水量的大小上。孔隙水含量不同,土体颗粒表面所吸附的离子溶于水中的数目就不同,导电性能也就不同;同时,孔隙水的含盐量(在地下水的情况下为矿化度)不同,导电特性也不同^[9]。

故土体的导电性主要涉及2个不同的过程:通过孔隙水导电与颗粒表面导电(阳离子导电)^[10]。关于土体的导电性,许多研究者^[11-14]通过研究土的电阻率来反映土的组成和结构特征。土的电阻率就是当电流垂直通过边长为1m的立方体土时所呈现的电阻大小,电阻是表征物体导电能力大小的一个参数,即

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

式中: L ——导体的长度,m; A ——导体的横截面积, m^2 ; ρ ——导体的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。本文所采用的电导 G 是电阻的倒数,即 $G = 1/R$,电导测值越大,表明电阻越小,导电性能越好;反之导电性能越差。

2 膨胀土裂隙电导特性试验原理与方法

2.1 试验背景

试验依托江苏省镇江市南徐大道黄山边坡治理工程进行,该边坡工程位于著名百米宽的景观大道南侧风光带黄山公园内。场地原为黄山低丘,坡体和坡脚卸土后形成目前1:3~1:5的边坡,已覆盖植被,并设置了一部分排水系统。2003年7月4~6日遇百年罕见的特大暴雨,边坡体产生较大规模的蠕动和滑动,在靠近路边地段形成泥石流^[15]。镇江市边坡地质灾害发生频繁且分布较为广泛,多数发生在下蜀组黏土层中,集中分布在高程为15~70m的山冈地区,少数分布在运河沿岸、长江沿岸和低山丘陵区^[16]。试验用土取自该边坡膨胀土,其基本性质如下:含水率为22.4%,土粒相对体积质量为2.71,液限为41.3%,塑限为24.8%,塑性指数为17,液性指数为-0.14,自由膨胀率为44.5%左右。

2.2 试验原理与方法

如图1所示,在地表2点A与B布置2个石墨电极,通过测量仪器——电导仪中的干电池向2个电极供电(直流电),在地表以下形成直流电场^[17]。在该2点引出电线,采用电导仪测量2点之间的电导值就可观测土体电导随裂隙发育的变化情况。

2个点电源电场之间的电流传递主要通过图1中虚线所示的电流线来传递,在2个点电源之间采用人工方法模拟土体裂隙发育,从而切断了部分电流线,测量值从而也发生了相应的变化。基于该原理,只

要测量2个点电源之间的电学参数,就可以推知2个点电源之间土体的结构、含水率等的变化,这便是利用电学参数来反映土体变化的原理。推广开来,在现场试验中,可以在土体中布置若干对空间点电源,并对其进行监测,如果发现任意2个点电源之间的电学参数(不局限于电导)相对于初始值发生了剧烈变化,则可能是土体的结构、含水量等发生了变化。在地表以下布置石墨电极,测量任意2个点电源之间的电学参数有以下优点:(a)石墨电极非常容易获取,且不易在环境中腐蚀而影响测量效果;(b)因电极尺寸不同,测值亦不同,故可将第1次测值设为初值,后面测量均与初值进行比较;(c)埋设及测量方便,适合野外作业。

因此,可利用土体的导电性,通过测量土体中2点之间的电导来分析土体的裂隙发展。电导通过埋设在土体中的石墨电极获得,石墨电极的尺寸规格统一为 $2\text{ cm} \times 1.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ (长×宽×高),数目按试验需要而定,并且对称布置。同一次试验中采用相同规格的电极尺寸,便可以排除因电极尺寸不同对测量值的影响。因采用干电池向测量电极供电,通过土体的电流极小,不会和土体发生电化学反应而改变土体的基本性质,这使试验误差在一定程度上减到最小。当土体中有裂隙发育时,裂隙两端的电极对的电流传导被部分阻隔,测量所得的电导相应发生了变化。试验中采用绝缘塑料片切割土体的方法模拟土体裂隙发育,并且严格控制裂隙的宽度与深度。这里仅模拟标准形状下的裂隙发育,是天然裂隙的一种实验室模拟。在试验过程中,土体

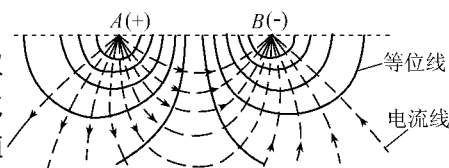


图1 2个异性点电源电场
Fig. 1 Electric fields of two sources with opposite electrical behaviors

温度基本维持室温(20±0.5)℃ ,土体含水率变化很小.

2.3 试验过程及分析

共进行了 4 组含水率(质量分数)约为 30%、密度约为 1.9 g/cm³ 的膨胀土电导随裂隙发展变化试验 ,做法是将原状土烘干后碾碎过筛加水拌匀 ,在底面直径 15 cm、高 15 cm 的圆柱形容器中压实制成 ,该含水率下土体接近饱和 ,土体塑性较高 ,易于试验操作 ,试验时模拟裂隙中无水. 4 组试验内容见表 1 ,电极布置见图 2 ,试验结果见图 3 ,作为例子 ,将试验 1 的 4 对电极的电导初值及各测值与初值的比值列于表 2 ,其余试验的测值未一一列出.

表 1 4 组试验相关情况

Table 1 Content of four groups of tests

试验编号	研究内容	电极对布置	裂隙产生顺序
1	电导与裂隙位置的关系	图 2(a)	在电极对 1-2、3-4、5-6、7-8 间依次产生
2	电导与裂隙长度的关系	图 2(b)	从中间电极对 1-2 向两边电极对 3-4、5-6 发展
3	电导与裂隙深度的关系	图 2(b)	1 条裂隙在 3 对电极对间从表面向深处发展
4	电导与裂隙数目的关系	图 2(b)	依次产生阻隔 3 对电极对的 4 条贯通裂隙

表 2 试验 1 电导测值

Table 2 Measured values of electric conductance of Test 1

测量 电极对	各电极对 电导初值/ mS	模拟裂隙 1 与 2 之间至 7 与 8 之间依次产生时 各电极对电导测值与初值的比值			
		1 与 2 之间	3 与 4 之间	5 与 6 之间	7 与 8 之间
1-2	3.02	0.86	0.86	0.86	0.90
3-4	3.12	1.00	0.84	0.89	0.91
5-6	2.87	1.00	1.00	0.87	0.89
7-8	2.58	0.99	1.01	1.00	0.88

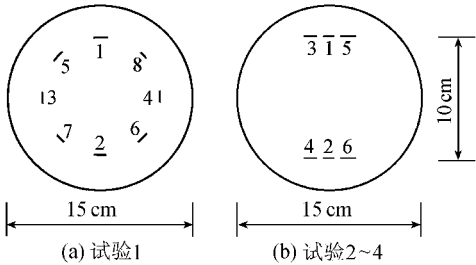


图 2 电极布置简图

Fig. 2 Disposition of electrode couples

—○— 电极对 1-2 —□— 电极对 3-4 —▲— 电极对 5-6

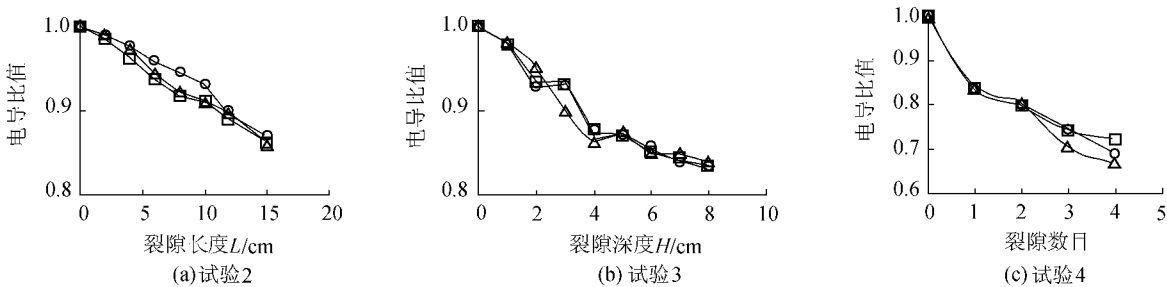


图 3 试验 2~4 结果

Fig. 3 Results of Tests 2 , 3 and 4

试验 1 中的电极片对称布置在圆柱形桶体的四周 ,如图 2(a)中编号 1~8 所示 ,每个编号处对应一个石墨电极片 ,布置方式统一 ,采用绝缘塑料片切割土体模拟裂隙的产生 ,裂隙长 2 cm、宽 0.5 cm、深 2 cm ,因为所测量的电导值仅代表该处土体的导电性能强弱 ,故对电导值做归一化处理 ,绘制规律图.从表 2 可以看出 ,当第 1 条模拟裂隙在 1-2 电极对的 1 处发育时 ,其电导值与初值的比值发生骤降 ,降到 0.9 以下 ,而其他电极对基本没有变化 ,当模拟裂隙在 3-4 电极对的 3 处发育时 ,该对电极的电导比值马上回落 ,而 1-2 电极对保持刚才下降的比值基本不变 ,5-6 和 7-8 没有变化 ,以此类推.这说明 ,模拟裂隙在某对电极对的连线之间发育 ,该电极对的电导比值就下降 ,而不影响其他电极对的电导比值.也就是说 ,电极对之间的电流通过土体来传导 ,当模拟裂隙阻碍了某对电极之间的电流传导时 ,则该对电极之间的测值下降 ,模拟裂隙若没有阻碍某对电极之间的电流传导 ,则该对电极之间的测值不受影响.换言之 ,通过电导比值变化可探测裂隙发育位置.

试验 2 中电极片相对布置(3 对电极片相对布置 ,布置方式统一) ,3 对电极互相验证 ,裂隙的发育从中间向两边逐步变化 ,裂隙宽 0.5 cm ,深 2 cm. 从图 3(a)可以看出 ,随着裂隙的发育 ,电导比值从无裂隙状态的 1 下降到 0.86 处 ,而且基本呈线性变化.

试验3中裂隙的深度由0~8 cm逐步加深变化(模拟裂隙长2 cm,宽0.5 cm,深度变化的步长为1 cm)。从图3(b)可以看出,无裂隙时, β 对电极对的电导值与初值的比值为1,随着裂隙的逐步加深,电导也随之下降,当达到8 cm深度时,比值基本维持在0.83处,电导比值与裂隙深度的发展基本呈线性关系。

试验4中裂隙的数目为0~4条,裂隙长10 cm,宽0.5 cm,深2 cm。从图3(c)可以看出,无裂隙时, β 对电极对的电导值与初值的比值为1,随着第1条裂隙的出现,比值下降到0.85以下,随着第2条、第3条和第4条裂隙的出现,电导随之下降,最后比值下降到0.7附近,电导比值和裂隙数目的发展基本呈线性关系。

3 结 论

4组不同的室内膨胀土裂隙发育模拟试验表明,通过电导变化可探测裂隙发育位置,随着裂隙长度的增大,土的电导比值降低明显,随着裂隙深度的加大,土的电导比值也随之降低,随着裂隙数目的增加,土的电导比值也明显降低,所以,用电导来反映土体裂隙发育有一定的可行性。

现场试验中,在电导明显变化处,除了含水率细微变化的影响外,更多的是裂隙发育的影响,这对工程实际中膨胀土结构分析也具有一定的借鉴和指导意义。由于通过土体的导电特性来研究土体的裂隙性质在国内处于起步阶段,对电极的大小、导线长度、土体类型等影响因素尚需进一步的探讨和完善,虽然如此,该方法在土体结构性和参数预测方面具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 孙长龙,殷宗泽,王福升,等.膨胀土性质研究综述[J].水利水电科技进展,1995,15(6):10-14.
- [2] 缪林昌,刘松玉.论膨胀土的工程特性及工程措施[J].水利水电科技进展,2001,21(2):37-40.
- [3] 仲晓晨,殷宗泽.膨胀土边坡的稳定性分析研究[J].水利水电科技进展,1998,18(增刊):1-5.
- [4] 袁俊平,殷宗泽.考虑裂隙非饱和膨胀土边坡入渗模型与数值模拟[J].岩土力学,2004,25(10):1581-1586.
- [5] 袁俊平,殷宗泽,包承纲.膨胀土裂隙的量化手段与度量指标研究[J].长江科学院院报,2003,20(6):27-30.
- [6] 易顺民,黎志恒,张延中.膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[J].岩土工程学报,1999,21(3):294-298.
- [7] 陈兴岗.南友公路含裂隙非饱和膨胀土路堑边坡监测与稳定性分析[D].长沙:中南大学,2006.
- [8] 陈水安,黄平安,黄文县.膨胀土的工程特性及改良的探讨[J].西部探矿工程,2005(5):108-109.
- [9] 康辉平.土的电阻率与土工参数相关性实验研究[J].水利科技,2006(4):40-43.
- [10] 胡卸文,李群丰,赵泽三,等.裂隙性黏土的力学性质[J].岩土工程学报,1994,16(4):81-88.
- [11] CHEN Liang, YIN Zong-ze, ZHANG Pei. Relationship of resistivity with water content and fissures of unsaturated expansive soils[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 17(4):537-540.
- [12] 查甫生,刘松玉.土的电阻率理论及其应用探讨[J].工程勘察,2006(5):10-15.
- [13] 刘松玉,查甫生,于小军.土的电阻率室内测试技术研究[J].工程地质学报,2006,14(2):216-222.
- [14] KALINSKI R, KELLY W. Electrical resistivity measurements for evaluating compacted soil liners[J]. J Geotech Engrg, ASCE, 1994, 120(2):451-457.
- [15] 张可嘉.景观区膨胀土边坡失稳机理分析及其治理方法研究[J].江苏建筑,2006(4):44-47.
- [16] 崇婧,李徐生,杨达源,等.镇江市边坡地质灾害及其防治对策[J].灾害学,2002,17(1):20-25.
- [17] 陈仲侯,王兴泰,杜世汉.工程与环境物探教程[M].北京:地质出版社,1993.

Electric conductance characteristics of fissures of expansive soil

GONG Yong-kang¹, CHEN Liang¹, WU Guang-fan²

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to understand the variation of electric conductance corresponding to the development of fissures of expansive soil, four groups of laboratory tests on the variation of the electric conductance with various locations, lengths, depths and quantities of fissures were carried out. Artificial methods were adopted to perform the simulation of fissures. The test results show that the location of fissures can be discovered by monitoring the electric conductance of soil, and the electric conductance of soil decreases with the increase of length, depth and quantity of fissures.

Key words: expansive soil; fissure; electric conductance; laboratory test