

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.01.012

## 附加电场条件下吹填土的电性响应

欧孝夺<sup>a,b</sup>, 黄展案<sup>a</sup>, 柳子炎<sup>a,b</sup>, 潘鑫<sup>a,b</sup>

(广西大学 a. 土木建筑工程学院 南宁 530004; b. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室 南宁 530004)

**摘要:**以广西北部湾经济区吹填土作为研究对象,将土样置于稳定直流电场中,通过控制电场的有无,同时调整场强、土样含水率、密实度以及淡化程度,研究不同条件下土体内部电荷的变化规律,初步模拟雷雨云与大地之间的电性响应,以便进一步探究岩土体的“引雷”机制。结果表明,附加电场与大气电场均对土体内部电荷变化存在影响,且随着场强的增大表现得更显著;高含水率、低淡化程度,能促进电荷移动,增强土体导电性能,但含水率升高到一定程度后这种作用趋于稳定状态;土体密实度对其内部电荷分布具有一定影响,但规律性不明显。

**关键词:**附加电场;吹填土;电荷;电性响应

**中图分类号:**TU442 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)01-0081-06

## Analysis on Dredger Fill Electrical Response Under Additive Electrical Field

Ou Xiaoduo<sup>a,b</sup>, Huang Zhanan<sup>a</sup>, Liu Ziyang<sup>a,b</sup>, Pan Xin<sup>a,b</sup>

(a. College of Civil Engineering and Architecture;

b. Ministry of Education Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China)

**Abstract:** With the purpose of the study on change rule of internal charge in soil specimens under differing circumstances, dredger fill, which was collected from Guangxi Beibu Gulf Economic Zone, was studied in various parameters, including the absence/presence of the applied DC electric field, different levels of field strength, soil water content, soil compactness, and degree of desalination. Moreover, through tentatively simulating the electrical response between thundercloud and earth mass, the triggered lightning mechanism of rock soil mass was explored. The results show that both additive electrical field and atmospheric electric field had influence over charge variation of soil, the impact of which would become more significant with the increasing field strength. Higher soil water content and lower degree of desalination could enhance the charge variation and conductivity of soil, whilst this action effect would remain stable when soil water content reached a certain degree. Although soil compactness make some effect for the charge distribution, its regularity is undefined so far.

**Key words:** additive electric field; dredger fill; charge; electrical response

近年来,随着地下工程建设、环境保护以及灾害防治等方面的需要,岩土体电性的研究成为热点,但

总体来说尚处于起步阶段,主要以岩土体电阻率工程物探应用及土的电阻率与土性关系研究为主<sup>[1-3]</sup>,

收稿日期:2013-04-18

基金项目:国家自然科学基金(51168004);广西自然科学基金(2010GXNSFD013002);教育部科学技术研究重点项目(210162)

作者简介:欧孝夺(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事土体结构及其环境效应研究,(E-mail)ouxiaoduo@163.com。

重点分析影响土电阻率的相关因素<sup>[4-5]</sup>,以及土电性与其力学性质之间的相互关系<sup>[6]</sup>。另一方面,土介电常数的影响变化因素及测定方法也有相关研究报道,主要为地下工程的探测提供重要依据<sup>[7-8]</sup>。对于外电场作用下的土体电性研究,多数涉及电渗<sup>[9-10]</sup>和渗流分析<sup>[11]</sup>这两方面。庄艳峰等<sup>[12-13]</sup>对电渗的电荷累积规律及界面电阻问题进行相关研究,王柳江等<sup>[14]</sup>则综合考虑电渗场、渗流场与应力场的耦合关系,进行了电渗固结分析。综合所述,目前国内外的研究成果主要集中在土的电性与其物理力学性质关系<sup>[15]</sup>以及土壤修复技术方面<sup>[16-18]</sup>,而外加电场作用下岩土体的电性参数变化特征的相关研究鲜见报道。

地球表面的岩土体时刻受外部电场的作用,特别是在雷雨天气,这种作用更为强烈。通过研究雷电场作用下岩土体的电荷累积规律及其影响因素,建立两者之间的电性响应机制,可探索、获得防雷减灾的新途径。以广西北部湾多雷地区“人造陆域”吹

填土为研究对象,对其施加低压外电场,并通过改变电场强度、土体含水率、密实度以及淡化程度,观察吹填土内部电荷变化规律,初步探究外电场与岩土体之间的电性响应。

## 1 土样制备与试验方法

### 1.1 土样制备

1.1.1 土样的理化性质 试验吹填土采自广西钦州港保税区,从表观上看,土样略带黑色,土质结构均匀,附带少量淤泥,含水量趋于饱和。吹填土的土工试验参数见表 1。

吹填土的颗粒组成及颗粒级配曲线分别如表 2、图 1 所示。由表 2 可以看出,吹填土中粒径大于 0.075 mm 的颗粒其质量占试样总质量的 50%~85%,认为该试验土样为粉砂土。由图 1 可知,试验土样的曲率系数  $C_c = 2.01$ ,不均匀系数  $C_u = 6.33$ ,级配良好。

表 1 吹填土土工试验参数

含水率/%	比重	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙比		渗透系数/ ( $10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	压缩系数/ $\text{MPa}^{-1}$	三轴剪切试验	
			$e_{\max}$	$e_{\min}$			$C/k\text{Pa}$	$\varphi/(\circ)$
25.5	2.68	1.98	1.16	0.42	8.09	0.055	19.6	35.7

表 2 吹填土颗粒组成

粒径大小/mm	百分含量/%
>2.00	2.53
2.00~0.50	7.96
0.50~0.25	2.16
0.25~0.075	57.08
0.075~0.05	11.96
0.05~0.005	15.37
0.005~0.001	2.94

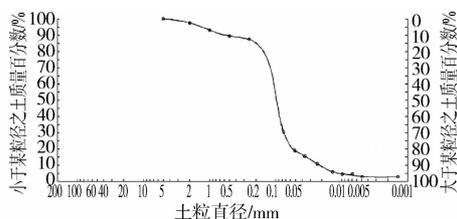


图 1 吹填土颗粒级配曲线

1.1.2 土样制备 土样制备流程如下:1)将土样碾散、风干,过 2 mm 筛后充分搅匀,取少量土进行含水率  $\omega$  测定。2)参照《土工试验规程》(SL237—1999),计算土样所需加水量,并进行闷土。3)将闷好的土样分层放入塑料套管,并用击实锤击实至拟

定体积,每层土样的质量根据拟定的密度及体积计算得到。当一层土样击实完毕,在其表面放置一根电势探针,再继续装入土样击实下一层。成型后土样为圆柱状,直径 15.4 cm,高 18 cm。电势探针由下至上呈直线分布,分别编号为 1、2、3、4、5,相邻电势探针间隔 4.5 cm,土样制备过程如图 2 所示。

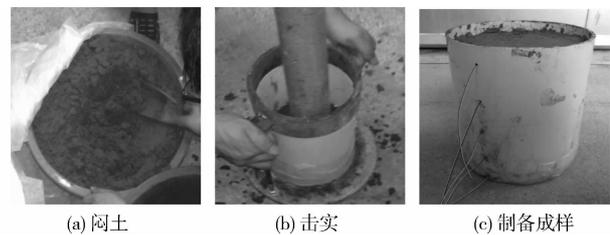


图 2 土样制备过程

### 1.2 试验原理

以直流电源(0~150 V)作为电场来源,塑料套管上方铜板接入直流负电作为阴极,下方铜板接入直流正电作为阳极,两块铜板之间距离为 20 cm,构成一个匀强电场(试验原理如图 3 所示)。土样高 18 cm,上端与负极铜板之间距离约为 2 cm,下端与正极铜板靠近但不接触。接通电源,使土样处于匀强电场中,利用石墨电势探针及万能表测定不同探

针之间的电势差。

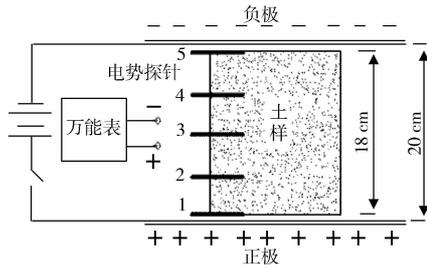


图 3 试验原理示意图

### 1.3 试验内容及方法

根据试验目的制备所需土样,按图 3 要求组装试验装置,然后置于环境发生器(能够维持一定温度、湿度,可以模拟环境变化)中进行试验。首先测定同一土样在有无外加电场作用下其两端电势差,比较两种情况下土体内部电荷变化差异;其次在施加外加电场条件下,通过调整电场强度、土体含水率、密实度和淡化程度,分别测定各探针之间电势差,比较分析影响土体内部电荷移动的相关因素。具体操作步骤如下:

1) 使用同一土体,在未接通电源情况下,每隔 1 h,使用万能表依次测定探针 1~2、1~3、1~4、1~5、2~3、2~4、2~5、3~4、3~5、4~5 之间的电势差。当读数基本稳定后,接通电源,使土体处于一个稳定的电场中。从加载电场开始,每隔 10 min 测定一次读数,当各组探针之间的电势差基本稳定后将电场关闭,继续每隔 30 min 测定一次,连续测定 48 h。

2) 调整电场强度、土体含水率、密实度和淡化程度,测定不同条件下各组电势差示值,测定方法与 1) 中接通电源后的方法一致。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 有无外加电场条件下土体内部电荷变化

假定加电场前所测电势差为初始值  $U_0$ , 加电场进行实验后某一时刻所测电势差为  $U_x$ , 通过公式  $U_L = U_x - U_0$ , 计算电势差累计变化量  $U_L$ 。根据  $U_L$  与时间  $t$  的变化关系描述土样内部电荷的变化规律,根据  $U_L$  的大小与正负判断电荷的移动方向及量的多少。

试验中分别测定吹填土在无外加电场及 350 V/m 附加电场作用下土体两端(探针 1~5)和内部(探针 2~4)电势差,土体密度为 1.90 g/cm<sup>3</sup>, 含水率为 17%, 环境发生器中温度为 29.5 °C, 其试验曲线如图 4 所示。从图中可以看出,在无外加电场作用下,探针 1~5 和探针 2~4 的电势差均为正值,且随试

验时间的延长而逐渐增大;探针 1~5 的电势差在试验前 40 h 内变化明显,40 h 后基本保持稳定,而探针 2~4 在整个试验过程中均未发生大幅度变化。在附加电场作用下,探针 1~5 和探针 2~4 的电势差均为负值,且随试验时间的延长而逐渐减小;两组探针测值在试验前 20 h 内基本保持稳定,20 h 后开始发生大幅度变化,其中探针 1~5 的变化幅度较大。

从上述试验结果来看,在有无外加电场条件下,土体内部电荷的变化情况存在差异。土体内部电势差在无外电场作用下为正,而在附加电场作用下为负,说明当不存在外电场时,土体内部正电荷沿竖直方向向下移动,负电荷则往相反方向移动。这是因为自然界存在方向向下的大气电场,土体内部正负电荷受电场力作用,沿竖直方向分别往两端移动;而施加了外电场后,综合电场的方向向上,与一般的雷雨电场相似。

另外,2 种试验条件下,探针 1~5 的电势差均比探针 2~4 大,即土体两端电势差较内部大,这从另一个方面说明电场的存在促进了土体内部电荷分别往上下两侧移动,形成电势降。

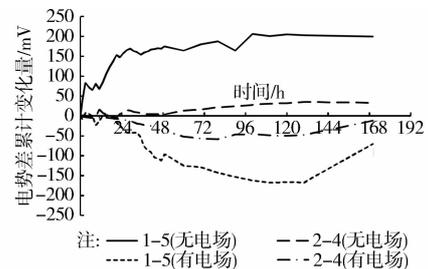


图 4 有无外加电场条件下土体内部电势差累计变化量

### 2.2 不同电场强度下土体内部电荷变化

通过对 5 种不同电场强度下土体内部电荷的变化情况进行研究,探讨电场强度对吹填土内部电荷变化的影响。5 种不同电场的场强分别为 150、250、300、350、500 V/m, 土体密度 1.90 g/cm<sup>3</sup>, 含水率 20%, 环境发生器中温度为 29.5 °C。不同电场强度下土体两端(电势探针 1~5)电势差变化曲线如图 5 所示。

从图 5 看出,在不同强度的外电场作用下,土体两端电势差随时间的变化关系差异明显。总体来说,在 150 V/m 的附加电场下,土体两端电势差变化幅度较小,基本保持稳定。分析原因,这是由于附加电场与大气电场场强大小接近,而方向相反,土体内部电荷受两种电场的作用相互抵消,未发生明显的移动,因此电势差变化保持稳定,这也印证了在无附加电场的情况下土体内部依然存在不断变化的电

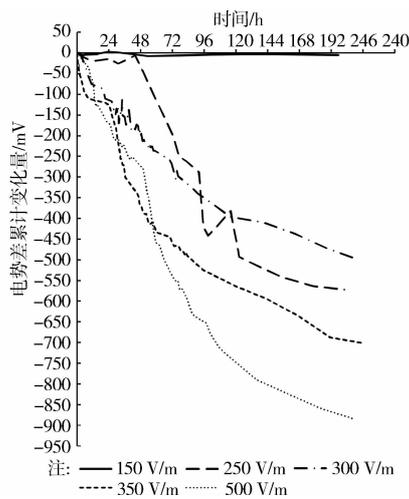


图 5 不同电场强度下土体内部电势差累计变化量

势差。而当附加电场场强达到 250 V/m 以上时,电势差测值发生明显的变化,500 V/m 时绝对值最大,其次是 350 V/m。综合分析,附加电场对土体内部电荷移动具有明显的促进作用,随着场强的增大,大气电场的作用逐渐被抵消,电荷受到的外电场力越来越大,电势差变化速率越快。

### 2.3 不同含水率下土体内部电荷变化

对 5 个土样分别施加 350 V/m 的电场,初步探讨在附加电场作用下,不同含水率的吹填土内部电荷变化特性。土样含水率分别为 10%、15%、20%、25%、30%,密度 1.90 g/cm<sup>3</sup>,环境发生器中温度为 29.5 °C。

选取电势探针 1~5 作为典型分析对象,其电势差累计变化曲线见图 6。从图中看出,不同含水率下土体两端电势差变化存在显著差异,尤其是当含水率处于 15%~20%之间时,试验曲线存在跳跃式变化。当含水率  $\omega \leq 15\%$  时,电势差测值变化幅度很小,在 0~-200 mV 之间变动,而当含水率  $\omega \geq 20\%$  时,电势差变化量显著增加,在 0~-900 mV 之间变动,且其变化幅度显著高于前者。总体来看,低含水率对土体内部电荷影响不大,电势差变化较缓慢,随着含水率升高到一定程度,试验数据产生大幅变化,电势差增长速率较快。这是由于土体内电荷的移动很大程度上依赖于液相,土中水对于带电离子的溶解,以及建立电荷的转移通道有着极大的促进作用。对于含水率  $\omega \geq 20\%$ ,试验曲线较接近,电势差变化相差不大,说明此时含水率继续增大并不能无限增强电荷的移动,而是慢慢地趋于稳定状态。

综合分析,含水率较低时,颗粒间孔隙水连通性较差,不利于电荷的移动。随着含水率的升高,孔隙水连通性逐渐得到改善,越来越多的电荷在附加电

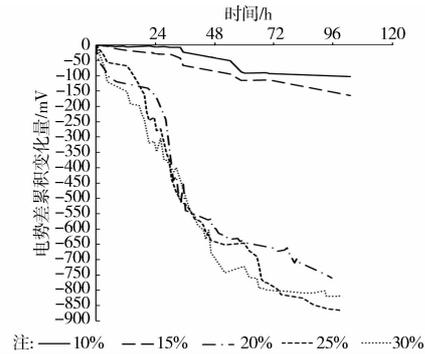


图 6 不同含水率下土体内部电势差累计变化量

场作用下作定向移动。当含水率继续升高到一定程度,此时土体颗粒孔隙已充满液态水,离子的溶解及电荷的移动接近极限状态,孔隙水的增多不能显著增强这种效应。

### 2.4 不同密实度下土体内部电荷变化

附加 350 V/m 电场,探究 3 种不同密实度下吹填土内部电荷的变化情况。吹填土的密实度分别为 0.3、0.5、0.8,含水率 17%,环境发生器中温度为 29.5 °C。

不同密实度下土体两端(电势探针 1~5)电势差变化曲线如图 7 所示。总体来看,各组试验中土体内部电荷变化迥异,影响规律并不明显。密实度为 0.3 时的电势差变化曲线与横轴非常接近,未有明显波动;0.5 和 0.8 密实度下的电势差随着时间存在一定的变化幅度,但两者变化方向相反。初步分析,尽管含水率一定,但密实度的变化会影响土体内部结构,饱和度等参数会发生改变。因此,在排除试验过程中操作不当的前提下,综合考虑吹填土物质组成及细观结构等因素,需进行更深层次的对比试验,以探究土体密实度是否与其他潜在影响因素存在协同作用。

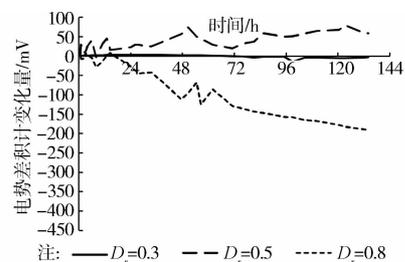


图 7 不同密实度下土体内部电势差累计变化量

### 2.5 不同淡化程度下土体内部电荷变化

对试验土样进行淡化,可以模拟雨水对吹填土的冲洗、过滤作用,以此来探讨在附加电场(350 V/m)作用下,不同淡化程度对土体内部电荷变化的影响规律。4 种不同淡化程度的吹填土内部水分含盐率分别

为 2.51% (未淡化)、2.19% (淡化 1 d)、1.05% (淡化 3 d)、0.18% (淡化 10 d), 相应的电阻率分别为 0.87、1.26、2.71、7.63  $\Omega \cdot \text{m}$ , 吹填土含水率均为 17%, 土样密度 1.90  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 环境发生器中温度为 29.5  $^{\circ}\text{C}$ 。

土体两端(电势探针 1~5)电势差变化曲线如图 8 所示。从图中可以看出, 经不同程度淡化后的土体两端电势差均随淡化时间的延长而减小, 开始试验 600 h 后, 各组结果差异显著, 未淡化的土样电势差变化最大, 而淡化 10 d 的最小。由此表明, 淡化程度对土体内部电势差变化具有显著的影响, 对吹填土的淡化导致其内盐分的流失, 可溶于孔隙水的离子浓度降低, 孔隙水导电性能减弱, 土体主要导电通道连通性较差, 未能充分发挥作用。结合电阻率数据也可以看出, 含盐量越高, 其土体电阻率越小, 对土体内部电荷移动的阻碍作用越弱。

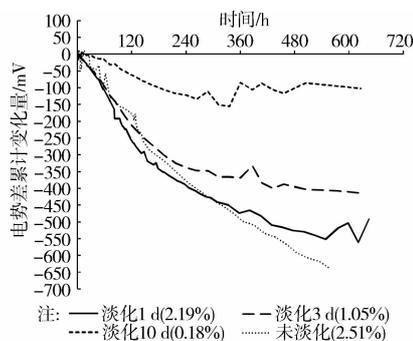


图 8 不同程度淡化后土体内部电势差累计变化量

### 3 结论

1) 在无外加电场条件下, 吹填土内部电荷仍受大气电场作用, 正电荷沿电场方向移动, 负电荷与之相反。

2) 试验表明, 随着大气电场作用逐渐被抵消, 附加电场对吹填土内部电荷移动产生显著影响。外电场场强越大, 土体两端的电势差变化幅度越大, 表明其内部电荷的移动、交换速率越快。

3) 吹填土的含水量、密实度、淡化程度等因素, 也能影响土体的导电性能。高含水量, 以及低淡化度, 在一定程度上增大了土体内部电荷移动的通道, 电势差累计变化幅度越大。而密实度对吹填土内部电荷移动的影响规律尚不明确, 需进行更深层次的试验研究。

#### 参考文献:

- [1] Yoon G L, Park J B. Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, B84: 147-161.

[2] Yoon G L, Oh M H, Park J B. Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer [J]. Environmental Geology, 2002, 43: 18-28.

[3] 陈仁朋, 陈伟, 王进学, 等. 饱和砂性土孔隙水电导率特性及测试技术 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 780-783.

Chen R P, Chen W, Wang J X, et al. Electrical conductivity of pore water in saturated sand and its measurement technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 780-783.

[4] 刘志斌, 张勇, 方伟, 等. 黄土电阻率与其压实特性间关系试验研究 [J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(1): 84-90.

Liu Z B, Zhang Y, Fang W, et al. Experimental research on relationship between electrical resistivity and compactibility of loess [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(1): 84-90.

[5] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 土的颗粒组成对电阻率的影响试验研究 [J]. 工业建筑, 2013, 43(3): 71-74.

Zha F S, Liu S Y, Du Y J, et al. Effect of soil grain composition on soil electrical resistivity [J]. Industrial Construction, 2013, 43(3): 71-74.

[6] 郭秀军, 刘涛, 贾永刚, 等. 土的工程力学性质与其电阻率关系实验研究 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 151-155.

Guo X J, Liu T, Jia Y G, et al. The study of the relationship between engineering mechanical properties and resistivity of soils [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 151-155.

[7] 宋雷, 张小俊, 李海鹏. 上海冻结粉质黏土介电常数的实测及规律分析 (0.1~1 GHz) [J]. 土木工程学报, 2011, 44(8): 107-110.

Song L, Zhang X J, Li H P. Dielectric constant measurement and analysis of Shanghai frozen silty clay (0.1~1 GHz) [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 107-110.

[8] 刘华贵, 曾健. 土壤介电常数-含水量关系模型比较 [J]. 土工基础, 2011, 25(2): 58-61.

Liu H G, Zeng J. Comparison of soil dielectric constant-Water content models [J]. Soil Engineering and Foundation, 2011, 25(2): 58-61.

[9] Su J Q, Wang Z. The two-dimensional consolidation theory of electro-osmosis [J]. Geotechnique, 2003, 53(8): 759-763.

[10] Reddy K R, Chinthamreddy S. Effects of initial from of chromium electrokinetic remediation in days [J]. Advances in Environmental Research, 2003, 7: 353-

- 365.
- [11] 房莹光, 丁凯, 马彦晓. 强电场作用下极细颗粒黏土渗流特性分析[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(1): 96-101.  
Fang Y G, Ding K, Ma Y X. Analysis on the permeability of fine clay particles under strong electric field [J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(1): 96-101.
- [12] 庄艳峰, 王钊. 电渗的电荷累积理论[J]. 岩土力学, 2004, 26(4): 629-632.  
Zhuang Y F, Wang Z. Electric charge accumulation theory for electro-osmotic consolidation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 26(4): 629-632.
- [13] 庄艳峰, 王钊. 电渗固结中的界面电阻问题[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 117-120.  
Zhuang Y F, Wang Z. Study on interface electric resistance of electro-osmotic consolidation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 117-120.
- [14] 王柳江, 刘斯宏, 汪俊波, 等. 电场-渗流场-应力场耦合的电渗固结数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1904-1911.  
Wang L J, Liu S H, Wang J B, et al. Numerical analysis of electroosmotic consolidation based on coupled electrical field-seepage field-stress field [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1904-1911.
- [15] Fukue M, Minato T, Horibe H, et al. The microstructures of clay given by resistivity measurements [J]. Engineering Geology, 2006, 54: 43-53.
- [16] 罗启仕, 王慧, 张锡辉, 等. 土壤无机离子在非均匀电场作用下的迁移[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 519-523.  
Luo Q S, Wang H, Zhang X H, et al. The mobilization of inorganic ions in soil by the action of non-uniform electric field [J]. China Environmental Science, 2004, 24(5): 519-523.
- [17] Fukue M, Minato T, Matsumoto M, et al. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers [J]. Engineering Geology, 2001, 60: 361-369.
- [18] Rohrs J, Ludwig G, Rahner D. Electrochemically induced reactions in soils—a new approach to the in-situ remediation of contaminated soils. Part 2: Remediation experiments with a natural soil containing highly chlorinated hydrocarbons [J]. Electrochimica Acta, 2002, 47: 1405-1414.

(编辑 王秀玲)

(上接第15页)

- [13] 张耀春, 丁玉坤. 防屈曲支撑、普通和特殊中心支撑钢框架结构抗震性能分析[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(5): 8-15.  
Zhang Y C, Ding Y K. Seismic response analysis of steel frames braces with buckling restrained, ordinary and special concentrically braces [J]. Progress in Steel Building Structures, 2009, 11(5): 8-15.
- [14] 孙建运, 刘青, 陆焯, 等. 钢结构束柱的抗侧性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(4): 112-119.  
Sun J Y, Liu Q, Lu Y, et al. Analysis of lateral resistant performance of steel bound-column [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(4): 112-119.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 228—2002 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 2002.
- [16] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(编辑 薛婧媛)