

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201712022



干湿盐渍耦合对夯土材料 劣化性能的影响

曾伟龙¹, 彭兴黔^{1,2}, 刘士雨^{1,3}, 叶俊捷¹

- (1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要: 取福建省龙岩市永定县已拆除的土楼墙体进行盐分测试, 制备与原土块盐分质量分数相似且含不同类别盐的土样试块, 并在干湿循环后, 进行抗压、抗剪强度试验. 结果表明: 土楼原土块的可溶性盐的质量分数为 0%~2%; 在干湿循环后, 随着含盐质量分数的增大, 试样的粘聚力及抗压强度呈现下降趋势, 内摩擦角则表现出先增长后减小的规律.

关键词: 土楼; 盐渍化; 盐分测试; 干湿循环; 强度试验

中图分类号: TU 411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)03-0376-06

Influence of Dry Wet Salting Coupling on Deterioration Performance of Rammed Soil Materials

ZENG Weilong¹, PENG Xingqian^{1,2}, LIU Shiyu^{1,3}, YE Junjie¹

- (1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Key Laboratory of Structural Engineering and Disaster, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
3. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Taking the demolished the soil wall in Yongding County, Longyan City, Fujian Province for salt test, the soil sample blocks with similar salt mass fraction in the original soil block but different types of salt were prepared. After the wet and dry cycle, the compressive and shear strengths were tested. The results show that the mass fraction of soluble salts in Tulou original soil blocks is 0% to 2%; after the wet and dry cycles, with the increase of salt mass fraction, the cohesion and compressive strength of the samples decrease, the internal friction angle increases initially and then decreases.

Keywords: Tulou; salinization; salt test; dry-wet cycle; strength test

福建土楼作为福建客家人引为自豪的建筑形式, 于 2008 年 7 月被正式列入《世界遗产名录》^[1], 是福建民居中的瑰宝^[2-3]. 土楼是由生土夯实成块后砌筑而成的^[4], 因而, 气候对福建土楼有显著的影响.

收稿日期: 2017-12-14

通信作者: 彭兴黔(1959-), 男, 教授, 博士, 主要从事结构风工程、结构稳定及优化和钢结构的研究. E-mail: pxq@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAK09B01); 国家自然科学基金资助项目(51178196, 51478197); 福建省自然科学基金面上资助项目(2015J01210); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1611304001)

丰富的降雨加上充足的阳光是福建地区普遍的气候特征之一,这使土楼处于干湿循环交替的环境中.一方面,土楼内部的渗流场、温度场发生变化,对土楼墙体产生一定的劣化作用;另一方面,干湿循环交替的环境会引起土楼墙体中的盐分发生反复溶解收缩,结晶膨胀的盐渍过程^[5],从而加剧土楼墙体的劣化.目前的研究主要集中在干湿、盐渍单独作用下对土体劣化性能的影响,而干湿盐渍耦合作用对土体劣化性能的影响研究较少,特别是在复合盐下的干湿盐渍耦合作用则更少.崔凯等^[6-8]研究了掺有硫酸钠及氯化钠的夯土在经历干湿循环后,随着夯土试块含盐量的增加,其崩解速度延长,抗压强度降低,风蚀速率增大.沈云霞等^[9]研究不同含量硫酸钠盐及氯化钠盐的夯土试块的抗剪强度,测得夯土试块的内摩擦角随含盐量的增加先增大后减小.文献[10-11]通过重塑土试验得出,在干湿循环过程中,增湿使土体软化是降低土体强度的重要因素,而多次干湿循环会加剧土体软化而导致强度变化. Zeid 等^[12]研究地下水盐度对粘性土性质的影响,得出与纯水粘土相比,含盐粘土的塑性指数下降、固结系数增加、最佳含水率提高、最大干密度降低,且无侧限抗压强度显著下降的结论.在环境的催化下,大量土楼存在毁灭的可能.因此,了解干湿盐渍耦合作用的变化特点,对土楼这类文物的保护上具有一定的科学指导意义.基于此,本文取福建永定县原土楼墙体拆除的土块进行土样的物理性能和土的盐分测定,了解土体盐渍劣化情况;以新土为样品,进行室内脱盐处理,模拟自然条件,对不同含盐类别和不同含盐质量分数的夯土试块进行干湿循环,测试其抗压及抗剪强度,并对其干湿盐渍劣化效应进行分析.

1 实验部分

1.1 干湿环境特征

分析 2000—2013 年福建省龙岩市永定县、漳州市南靖县和华安县的气候资料^[13-14]可知:永定县、南靖县和华安县的湿润指数分别为 2.26~2.51,2.51~2.91 和 2.07~2.26,相对湿度分别为(74.135±3.091)%,(71.891±3.151)%和(71.891±3.151)%,都为湿润地区.集中降雨主要发生在 3~9 月,其相对湿度达到 90%以上,但因为强烈的蒸发作用使其很快恢复到年平均湿度.在这种环境下,干湿循环作用会使土楼墙体严重劣化.

研究的土楼地处福建西部的永定县,土楼所在地属于亚热带海洋性气候,地貌特点属于中低山丘陵,年平均温度为 20.1℃^[15],年降雨量约为 1 400~1 800 mm,年平均相对湿度为(74.135±3.091)%.

1.2 含盐特征

选取已拆除土楼(紫气楼)的夯土土块敲碎后,用 2 mm 的筛子过筛.取墙体的上、中、下部位各 3 个试块,将 3 个墙体上部位土块标记为 X1,X2,X3,3 个墙体中部位试块标记为 Y1,Y2,Y3,3 个墙体下部位试块标记为 Z1,Z2,Z3,随机选取土楼墙体部位的 10 个其他试块标记为 W1,W2,W3,W4,W5,W6,W7,W8,W9,W10.土样中各盐分的质量分数(w),如表 1 所示.由表 1 可知:各种盐的质量分数分布在 0%~2%之间;墙体上、中、下部位试块的 $w_{\text{水溶性盐}}$ 有明显的差异,墙体下部位试块的 $w_{\text{水溶性盐}}$ 高于上、中部位试块;墙体的上、中、下部位试块的 $w_{\text{水溶性盐}}$ 有递增的趋势;阴离子中, $w_{\text{HCO}_3^-}$ 相对于 w_{Cl^-} 和 $w_{\text{SO}_4^{2-}}$ 较高;阳离子中, $w_{\text{Ca}^{2+}}$ 最高.

表 1 土样的盐分测定结果

Tab. 1 Test results of salt in soil samples

%

| 试块 | $w_{\text{水溶性盐}}$ | $w_{\text{HCO}_3^-}$ | w_{Cl^-} | $w_{\text{SO}_4^{2-}}$ | $w_{\text{Ca}^{2+}}$ | $w_{\text{Mg}^{2+}}$ | w_{Na^+} | w_{K^+} |
|----|-------------------|----------------------|-------------------|------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|------------------|
| X1 | 0.142 | 0.071 | 0.054 | 0.023 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| X2 | 0.091 | 0.031 | 0.037 | 0.004 | 0.013 | 0.002 | 0.009 | 0.009 |
| X3 | 0.053 | 0.048 | 0.016 | 0.260 | 0.220 | 0.003 | 0.017 | 0.005 |
| Y1 | 0.128 | 0.036 | 0.020 | 0.022 | 0.034 | 0.002 | 0.008 | 0.012 |
| Y2 | 0.715 | 0.147 | 0.029 | 0.054 | 0.032 | 0.004 | 0.032 | 0.033 |
| Y3 | 0.325 | 0.159 | 0.025 | 0.035 | 0.052 | 0.003 | 0.016 | 0.015 |
| Z1 | 0.930 | 0.136 | 0.038 | 0.042 | 0.065 | 0.019 | 0.028 | 0.026 |
| Z2 | 1.680 | 0.159 | 0.034 | 0.071 | 0.072 | 0.016 | 0.050 | 0.024 |
| Z3 | 1.463 | 0.102 | 0.040 | 0.094 | 0.068 | 0.004 | 0.025 | 0.016 |
| W1 | 0.715 | 0.103 | 0.024 | 0.023 | 0.058 | 0.003 | 0.018 | 0.033 |

续表

Continue table

%

| 试块 | $w_{\text{水溶性盐}}$ | $w_{\text{HCO}_3^-}$ | w_{Cl^-} | $w_{\text{SO}_4^{2-}}$ | $w_{\text{Ca}^{2+}}$ | $w_{\text{Mg}^{2+}}$ | w_{Na^+} | w_{K^+} |
|-----|-------------------|----------------------|-------------------|------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|------------------|
| W2 | 0.325 | 0.095 | 0.015 | 0.015 | 0.043 | 0.006 | 0.009 | 0.032 |
| W3 | 1.833 | 0.143 | 0.018 | 0.062 | 1.019 | 0.006 | 0.016 | 0.017 |
| W4 | 1.572 | 0.128 | 0.052 | 0.058 | 0.092 | 0.008 | 0.017 | 0.012 |
| W5 | 0.710 | 0.186 | 0.036 | 0.011 | 0.028 | 0.009 | 0.003 | 0.015 |
| W6 | 1.256 | 0.112 | 0.083 | 0.063 | 0.060 | 0.003 | 0.017 | 0.038 |
| W7 | 0.937 | 0.133 | 0.042 | 0.072 | 0.007 | 0.012 | 0.019 | 0.075 |
| W8 | 0.860 | 0.147 | 0.032 | 0.024 | 0.021 | 0.004 | 0.009 | 0.015 |
| W9 | 1.441 | 0.162 | 0.044 | 0.036 | 0.042 | 0.005 | 0.010 | 0.014 |
| W10 | 1.133 | 0.135 | 0.053 | 0.021 | 0.032 | 0.001 | 0.012 | 0.014 |

1.3 土的基本特征

对已拆除土楼的夯土试块进行物理性质测试,其颗粒级配如表 2 所示.

表 2 土的颗粒级配

Tab. 2 Grain grading of soil

| 试块 | 粒径分布范围/mm | | | | | | |
|----|-----------|------|---------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| | >2 | 2~1 | 1.0~0.5 | 0.50~0.25 | 0.25~0.10 | 0.100~0.075 | 0.075~0.005 |
| X | 0.66 | 5.24 | 9.67 | 8.32 | 11.89 | 13.22 | 28.79 |
| Y | 0.56 | 3.77 | 6.51 | 7.52 | 11.78 | 15.97 | 27.39 |
| Z | 0.37 | 3.93 | 6.38 | 10.59 | 11.71 | 14.97 | 29.33 |

墙体上、中、下部位试块的含水率分别为 19.1%,17.6%,18.9%,液限 ω_L 为 37%,塑限 ω_P 为 22%,塑性指数 I_P 为 15,液性指数 I_L 为-0.19.

2 材料与方法

2.1 材料与制备

将经过充分碾碎的土样进行脱盐处理.去离子水与土样按照大于 1:5 的比例进行充分浸泡,然后,使用台式离心机以 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 进行固液分离,测量滤液的电导率.重复进行 5 次,直至滤液电导率小于 $300\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,即表示已脱盐成为素土.向脱盐后的土体中加入不同种类、不同质量分数的盐.其中,不同种类的盐分别为 NaCl , Na_2SO_4 , CaCl_2 , $\text{NaSO}_4+\text{CaCl}_2$;盐的质量分数以 0.4% 递增,从 0 增加到 2%.通过前期试验得到的含水率,配置不同质量分数的盐溶液,将制备的溶液喷在素土中,搅拌均匀,用保鲜膜密封 24 h,让其充分润湿.用夯土模制备边长为 70.7 mm 的立方体试块,其夯实过程分 3 层夯实,在室内环境下养护 15 d 后,进行干湿循环;直剪试块则是按一层夯实,然后用环刀直接割取,同样在室内环境下养护 15 d 后,进行干湿循环.

考虑永定县年平均温度和年平均相对湿度,采用恒湿箱模拟试块在自然干燥与湿润交替的环境变化过程,将试块置于温度为 20℃、湿度为 15%~90% 的变化环境中,进行干湿循环养护.每个循环阶段分为吸湿和放湿两部分,每个循环 24 h,每个阶段 12 h,共循环 3 次.

2.2 方法与仪器

2.2.1 抗压强度试验 对 4 个不同含盐类型组和不同含盐质量分数组的立方体试件进行干湿循环后,用万能试验机以 $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度进行加载,并以均匀的速率将试块加载到开裂破坏.

2.2.2 直剪试验 采取快剪法,对试件进行干湿循环后,用应变控制式直剪仪进行直剪试验.对上述不同组中的试块分别施加 100,200,300,400 Pa 的垂直压力,施加的剪切速率为 $0.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

土体的剪切力、粘聚力和内摩擦角的关系式为

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi.$$

(1)

式(1)中: τ_f 为土的抗剪强度; σ 为剪切面上的垂直应力, $\sigma=P/A$, A 为试样面积; ϕ 为土的内摩擦角; c 为粘性土的粘聚力.

土块试件的剪应力及剪切位移计算式为

$$\tau = KR, \quad \Delta L = 20n - R. \tag{2}$$

式(2)中: τ 为试件所受的剪应力; K 为测定计校正系数; ΔL 为剪切位移.

3 结果与分析

3.1 对夯土材料抗压强度的影响

经历干湿循环后,测得不同含盐质量分数、不同含盐类型试块的抗压强度变化,如图 1 所示. 图 1 中: F_{cu} 为抗压强度; w 为盐的质量分数. 由图 1 可知:随着夯土试块中盐质量分数的增加,4 种不同含盐试块的抗压强度都下降,但变化形式有所不同;当盐的质量分数小于 0.8% 时,含单盐试块的抗压强度减小速率较小,当含盐质量分数大于 0.8% 时,抗压强度急速下降;而复合盐试块抗压强度减小的速率较均匀.

对比抗压强度和含盐质量分数可知:在同等质量分数下,含 NaSO_4 试块的抗压强度低于含 NaCl 试块;随着盐质量分数的增加,含 NaSO_4 试块的抗压强度下降速率比其他两种单盐试块更快,这是由于在土体内部, NaSO_4 盐受到吸湿、放湿的作用而产生结晶,膨胀的效果更明显,晶体不断增多,从结构内部产生的压力也就增大,所以才会出现抗压强度下降如此快的现象;而含 CaCl_2 土样下降趋势比其他两种单盐缓,原因可能是 Ca^{2+} 与土体中的其他阴离子反应形成固体,进而成为骨架,填充了土体的孔隙.

复合盐的抗压强度明显低于其他 3 种单盐,这可能是由于复合盐中 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 在土体里形成微溶物,经过干湿循环后,微溶物不断增多,进而使土体从内部膨胀,抗压强度显著下降. 从试块试验的现象中可以看出,随着复合盐质量分数的增多,其表面开始析出白色晶体,这与土体干湿循环后,晶体会富聚在土体表面,造成土体盐渍劣化的情况相呼应.

3.2 对夯土材料抗剪强度的影响

粘聚力和内摩擦角作为抗剪强度的主要参数,影响着剪切强度的变化,而土体的抗剪强度又是材料性能的主要特征指标.

经历干湿循环后,3 种单盐试块的粘聚力和内摩擦角随单盐质量分数的变化,如图 2 所示. 对比不同单盐与复合盐试块的粘聚力和内摩擦角随盐的质量分数的变化,如图 3 所示.

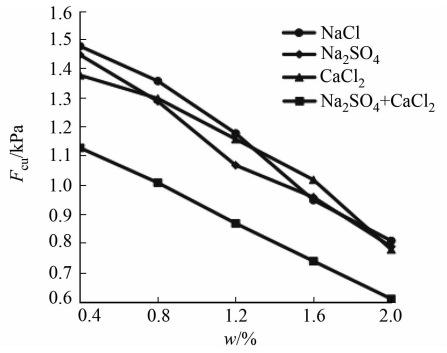
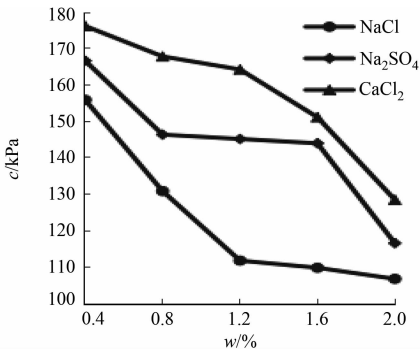
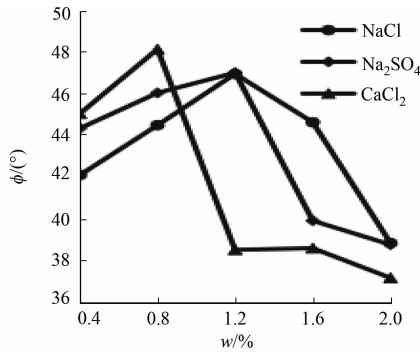


图 1 夯土试块抗压强度随含盐质量分数和含盐类型的变化
Fig. 1 Variation of compressive strength of rammed earth specimens with salt mass fraction and salt type



(a) 粘聚力



(b) 内摩擦角

图 2 3 种单盐试块的粘聚力和内摩擦角随单盐质量分数的变化

Fig. 2 Variation of cohesion and internal friction angle of 3 single salt blocks with salt mass fraction

粘聚力作为夯土材料结构强度的重要指标之一,它是由土颗粒之间的引力和斥力综合作用而成的. 由图 2,3 可知:含盐的质量分数和粘聚力之间都存在较好的相关关系,不论加入哪种盐的试块,它们的

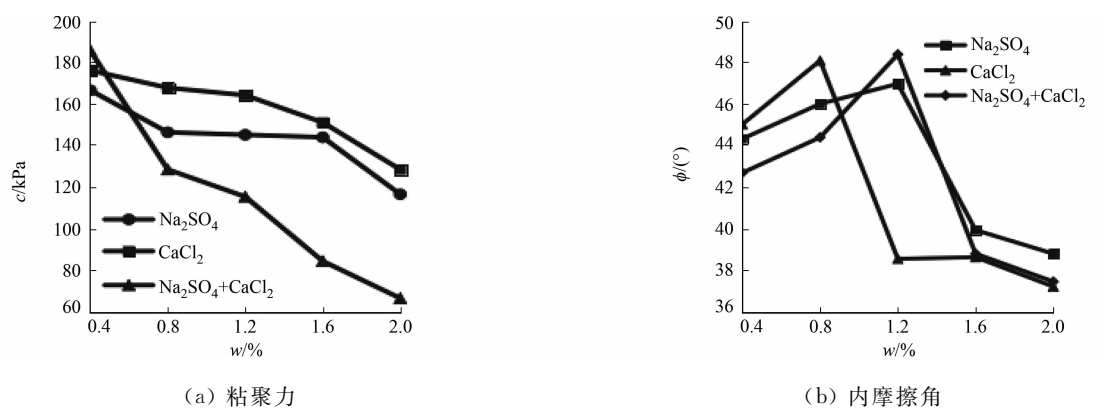


图 3 不同单盐与复合盐试块的粘聚力和内摩擦角随盐的质量分数的变化
Fig. 3 Variation of cohesion and internal friction angle of different single salt and composite salt blocks with salt mass fraction

粘聚力都随着盐质量分数的增加呈现出下降趋势。

土体的内摩擦角则不同于粘聚力,它的力主要来自土颗粒的表面摩擦力及颗粒间的嵌入和连锁作用产生的咬合力。内摩擦角变化的主要因素是颗粒之间的联系,颗粒之间的滑动摩擦和咬合摩擦主导着内摩擦角的变化。当夯土试块中盐的质量分数小于 0.8% 时,土体孔隙中的晶体相对较少,仅是附着在颗粒的表面,与颗粒之间的滑动摩擦增强,从而使内摩擦角在含盐质量分数在 1.2% 之前有明显增大的趋势。但随着盐的质量分数逐渐增大,再加上试块吸湿放湿的作用,土体内部的盐分出现结晶和溶解现象,对结构产生影响,造成土体中的部分空隙扩大加深,使土颗粒之间的咬合摩擦力减小。由此表现出如下 2 点规律。

- 1) 在含 $CaCl_2$ 盐的夯土试块中,当 $CaCl_2$ 的质量分数小于 0.8% 时,试块的内摩擦力增大;当 $CaCl_2$ 的质量分数为 0.8%~1.2% 时,试块的内摩擦力急速减小。
- 2) 在含 $NaCl, Na_2SO_4, Na_2SO_4+CaCl_2$ 盐的试块中,当盐的质量分数小于 1.2% 时,试块的内摩擦力增大;当盐的质量分数为 1.2%~1.8% 时,试块的内摩擦力急速下降。

由图 2(a)可知:在 3 种单盐质量分数相同的情况下, $NaCl$ 的粘聚力始终最低。在整个试块的干湿过程中,氯盐因湿度的变化从而产生结晶和溶解现象,使土体的孔隙体积增大,结晶产生的压力也随之增加,导致土体结构变得松散。由图 2(b)可知:3 种不同单盐的夯土试块的内摩擦角都表现出先增大后减小的趋势;当盐的质量分数小于 0.8% 时,含 $CaCl_2$ 试块的内摩擦角相比其他两种单盐大,但其衰减得更早更快。由此可见, $CaCl_2$ 质量分数的增加会使土样内摩擦角较早地进入衰减期。

由图 3(a)可知:随着盐质量分数的增加,含复合盐试块的粘聚力减少的速度高于其他两种单盐;而含 $CaCl_2$ 单盐土体的粘聚力虽然也随盐质量分数的增加而减少,但是其粘聚力均高于复合盐土体。在干湿循环过程中,复合盐的阴阳离子反应是造成土体盐渍劣化的重要原因之一。当盐的质量分数为 0.4% 时,含复合盐试块的粘聚力大于其他两种单盐,说明适当地处理好土体中盐分的比例,可以很好地控制土体盐渍劣化的进程。由图 3(b)可知:复合盐表面析出的晶体量超过了其他两种单盐的总和,结晶量从某种意义上来说是过多的。结晶量的初步增加造成土体滑动摩擦增长较快,且结晶对于夯土试块的破坏也逐渐增大,所以才会出现在盐质量分数为 1.2% 时,复合盐的内摩擦系数急剧下降。

4 结论

- 1) 在制备试块时,复合盐($Na_2SO_4+CaCl_2$)在混合初期便开始产生些许絮状微溶物;在试块养护完后,复合盐土体表面出现泛白晶状体,并且随着复合盐质量分数的增加,晶状体越来越多。
- 2) 干湿循环造成盐分析出的表聚性,抗压强度变化更多地取决于试样因含水量变化而发生反复地干缩-湿胀所引起的强度变化;在复合盐中,两种单盐(Na_2SO_4 和 $CaCl_2$)在干湿循环条件下会相互反应形成晶体,使土体内部的压力增大,导致土体变得松散,随着含盐质量分数的增加,土体盐渍劣化相对其他两种单盐更加严重。

3) 在盐的质量分数相同时,含 NaCl 盐夯土试块的直剪破坏早于其他两种单盐试块,而含 NaCl 盐试块表现出明显的结晶膨胀的物理特性,土体反复吸水放湿产生的收缩膨胀恰恰与含 NaCl 盐土体的收缩膨胀状态相同,所以,最直接的表现就是含 NaCl 盐试块的粘聚力始终低于其他两种单盐试块;而控制复合盐的质量分数可以减缓夯土的劣化;CaCl₂ 质量分数的增加会使试块摩擦力在某个质量分数时快速下降,这是因为 CaCl₂ 盐在干湿循环中产生较多的结晶,导致土体结构松散。

参考文献:

[1] 吕振亚. “福建土楼”被正式列入《世界遗产名录》[J]. 广西城镇建设, 2008(7): 35.

[2] 王梦琳, 赵祥. 土楼建筑文化的传承与发展探析[J]. 建筑与文化, 2014(2): 111-112. DOI:10. 3969/j. issn. 1672-4909. 2014. 02. 033.

[3] 黄汉民. 福建土楼: 中国传统民居的瑰宝[M]. 上海: 生活·读书·新知三联书店, 2003.

[4] 刘清颖. 中国古建-土楼的建筑结构浅析[J]. 建筑知识, 2017(2): 246.

[5] 沈云霞. 干湿循环作用下含盐类遗址土盐渍劣化试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011: 3-15.

[6] 崔凯, 谌文武, 王旭东, 等. 干旱区夯土遗址干湿盐渍耦合劣化微观结构分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2927-2933.

[7] 崔凯, 谌文武, 韩琳, 等. 干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1412-1418.

[8] 崔凯, 谌文武, 王旭东, 等. 干旱区土遗址盐渍带风蚀损耗效应微观机制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1167-1172. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-7598. 2012. 04. 030.

[9] 沈云霞, 谌文武, 杜伟飞, 等. 干湿循环下含盐量变化对遗址土剪切强度影响的试验研究[J]. 地震工程学报, 2011, 33(增刊 1): 227-230. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-0844. 2011. z1. 048.

[10] BARZEGAR A R, OADES J M, RENGASAMY P. Soil structure degradation and mellowing of compacted soils by saline-sodic solutions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(2): 583-588. DOI:10. 2136/sssaj1996. 03615995006000020035x.

[11] DEXTER A R, KROESBERGEN B, KUIPERS H. Some mechanical properties of aggregates of top soils from the IJsselmeer polders; 1. Undisturbed soil aggregates[J]. Netherlands Journal of Agricultural Science, 1984, 32(3): 215-227.

[12] ZEID M M A, EI-AAL A A. Effect of salinity of groundwater on the geotechnical properties of some Egyptian clay [J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2017, 26(3): 643-648. DOI:10. 1016/j. ejpe. 2016. 09. 003.

[13] 赵嘉阳, 王文辉, 郭福涛, 等. 福建省 2000—2013 年气象因子的变化趋势[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 5(45): 567-575. DOI:10. 13323j. cnki. j. fafu(nat. sci.). 2016. 05. 015.

[14] 林晶, 马治国, 陈家金, 等. 福建省地表干湿分布特征及其影响因子分析[C]//第 29 届中国气象学会年会. 沈阳: 中国气象学会, 2012: 1-9.

[15] 梁兰娣. 基于夯土劣化的土楼结构承载力研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2014.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)