

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1473

# 钙质砂中毛细水高度与影响因素试验研究

胡明鉴<sup>1</sup>, 张晨阳<sup>1,2,3</sup>, 崔翔<sup>1</sup>, 李焜耀<sup>1</sup>, 唐健健<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;  
2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 3. 广西大学 海洋学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 钙质砂是指富含碳酸钙或其他难溶碳酸盐类的海洋成因的特殊介质, 具有形状不规则、多孔隙且富含内孔隙等特点; 土体因孔隙特性而存在广泛的毛细现象, 植物根茎内的导管有如极细的毛细管, 能由此吸收土壤里的水分, 故钙质砂地层毛细水上升高度研究对岛礁生态研究有重要的意义。采用竖管法研究级配、粒径、干密度、盐度等因素对钙质砂毛细水上升高度的影响, 结果显示: 细颗粒含量越多、级配越好的连续级配钙质砂试样毛细水上升高度越高; 单一粒径钙质砂试样毛细水上升高度随粒径的增大而减小; 随着钙质砂干密度增加, 粒径小于 0.075 mm 时毛细水上升高度逐渐减小, 而粒径为 0.075 ~ 0.250 mm 时毛细水上升高度逐渐增大; 与淡水相比, 在低盐度下 NaCl 溶液对毛细水上升有抑制作用, 海水对毛细水上升有促进但效果微弱。钙质砂中毛细水上升高度随时间变化关系符合双对数坐标下的二次多项式关系, 其参量与钙质砂的物理性质以及溶液类型相关。

**关键词:** 钙质砂; 毛细水高度; 竖管法; 影响因素; 拟合分析

**中图分类号:** TU 411

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2019) 11 - 4157 - 08

## Experimental study on capillary rise and influencing factors in calcareous sand

HU Ming-jian<sup>1</sup>, ZHANG Chen-yang<sup>1,2,3</sup>, CUI Xiang<sup>1</sup>, LI Kun-yao<sup>1</sup>, TANG Jian-jian<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 3. College of Ocean, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

**Abstract:** Calcareous sand is a special medium with high calcium carbonate content or other insoluble carbonates, and has characteristics of irregular shape, porous and rich in inner pores. Capillary rise is a universal phenomenon in soil due to the pores. The tube inside rhizome is like a very fine plant capillary, which can absorb water from the soil. Therefore, the study on height of capillary rise in the calcareous sand has great significance to the ecological construction of the reef island. In this paper, the vertical tube tests are carried out to study the influence of gradation, particle size, dry density and salinity on the capillary rise in calcareous sand. Results show that the finer the particles and better gradation, the higher capillary water rise in the continuous graded calcareous sand. The height of capillary water rise decreases with increasing particle size in the single-sized calcareous sand. The capillary water rise decreases when the particle size is less than 0.075 mm with increasing dry density of the single-sized calcareous sand, while the height gradually increases with the particle size of 0.075-0.250 mm. Compared with fresh water, the NaCl solution inhibits the capillary water rise at low salinity, and the seawater promotes the capillary water rise but only weakly. The relationship between the height of capillary rise and time in calcareous sand fits well with the quadratic polynomial relationship in double logarithmic coordinates, and the physical properties of calcareous sand and the solution type are related to the parameters.

**Keywords:** calcareous sand; height of capillary rise; vertical tube test on capillary rise; influencing factors; fitting analysis

## 1 引言

毛细作用是指浸润液体在细管里升高和不浸润

液体在细管里降低的现象, 是液体的表面张力、内聚力和附着力等共同作用的结果。毛细现象在自然界、科学技术和日常生活中都起着重要作用, 水分

收稿日期: 2018-08-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 41572304, No. 41372313); 中科院科技先导专项 A 类子课题 (No. XDA13010301)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41572304, 41372313) and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA13010301).

第一作者简介: 胡明鉴, 男, 1974 年生, 博士, 研究员, 主要从事滑坡泥石流研究和地下水动力学方面的工作。E-mail: mjhu@whrsm.ac.cn

可以在较小直径的毛细管中上升到一定的高度是最常见的毛细现象,而多孔性的固体材料在与液体接触时,如砖块、纸张、纺织品、粉笔等吸水也属毛细现象。工程技术中常利用毛细现象使润滑油通过孔隙进入机器部件中去润滑机器。农业生产以及工程建设等多方面也存在着广泛的毛细现象,许多学者对此开展研究。董斌等<sup>[1]</sup>通过室内试验得到粗粒土的毛细水上升最大高度的拟合公式。李锐等<sup>[2]</sup>研究了膨胀土的毛细上升规律,并用 GEO-SLOPE 软件进行模拟。张平等<sup>[3]</sup>研究了颗粒级配对毛细水上升高度的影响,指出细粒含量的增多有助于毛细水上升。夏宁等<sup>[4]</sup>研究了不同初始含水率下的毛细水上升规律。栗现文等<sup>[5]</sup>研究了高矿化度对毛细水上升的影响,指出高矿化度不仅对毛细水重力产生影响,也使土体孔隙结构发生不同程度改变。苗强强等<sup>[6]</sup>通过自制的试验系统,根据湿润锋运动速度、土样含水率变化和吸力变化数值,得到了确定非饱和土渗水系数的方法。赵明华等<sup>[7]</sup>初步推导出毛细作用下单位体积路基土含水率的变化公式。米海存等<sup>[8]</sup>通过风干砂毛细上升试验,对比了解析法和 Terzaghi 经典公式对风积介质的适用性。Richards<sup>[9]</sup>推导了土壤水流的 Richards 方程,提出了水分能量的概念。George<sup>[10]</sup>研究了毛细上升以及蒸发导致盐晶析出而对墙体的破坏作用。这些针对砂土、盐渍土、膨胀土等不同土性、不同密实程度以及不同环境下的陆源沉积物的毛细现象研究,研究成果在农业生产和工程建设中发挥着指导和参考作用。

海洋生物成因的钙质砂,主要成分为碳酸钙或其他碳酸盐类,因其特殊生物作用和形成过程,保留着珊瑚虫骨骼结构,具有棱角度高、形状复杂易破碎、颗粒能胶结和富含孔隙和内孔隙等特征<sup>[11-12]</sup>,其物理力学特性和工程力学性质与一般陆相沉积物相比有较大的差异。处于海洋环境的珊瑚岛礁地下水富含盐分、钙质砂本身颗粒粒径、表面形态以及孔隙内孔隙等特性常使其能吸附大量盐离子,因而土体属性、所处环境等均与普通陆源环境的毛细现象存在很大差异,深入研究十分必要。研究发现,与普通陆源砂土相比,钙质砂的形状、表面孔隙等对其水力参数如饱和渗透系数、拖曳力系数等都具有影响<sup>[13-14]</sup>。而针对钙质砂非饱和水分运移的研究鲜有涉及。有研究表明,海洋环境的自然海岛在长期的自然作用、充沛的降雨补给等条件下逐渐形成悬浮在咸的海水之上的薄层淡化水,植物茎内的导管就是植物体内的极细的毛细管,它能把土壤里的水分吸上来,然而珊瑚岛礁地下水埋深约 3~5 m,

植物根茎尚不足以直接到达淡化水区。因而在地下水之上至地面一定深度,植物根系发育范围的土层中,因土体孔隙而存在的毛细现象,使淡化水通过毛细作用上升,达到植物根系能吸收的区域,植物能由此获得生长需要的淡水来源,有助于生态岛礁的建设。因而钙质砂毛细水上升高度和影响因素值得深入研究,可为海洋环境下的珊瑚岛礁生态建设提供参考。为此,本文通过不同级配、粒径、干密度和不同盐度溶液的毛细水上升高度试验,分析这些因素对钙质砂毛细水上升高度的影响。

## 2 试验原理与方案

### 2.1 试验设备与方法

竖管法的试验原理是基于毛细水作用机制。由于水-气分界面存在表面张力,收缩膜内的水分子有指向水体内部的不平衡力的作用,液面呈现内凹的形状。为保持平衡,收缩膜内必须产生张力。其作用方向与收缩膜表面相切,加上水有浸湿接触土壤的倾向,水在表面张力的作用下向上运动。在实际的土壤中随机分布着大小不一、形态各异的孔隙,这些孔隙是水分运移的通道和滞留的场所。在以往的研究中,土柱被概化为具有统计分布规律的平行毛管束模型,该模型对其力学行为进行了简化。当表面张力在竖直方向上的分量与水柱的重度相等时,毛细管水便达到最大高度<sup>[15]</sup>。毛细水上升高度可由下式计算得到:

$$h_c = \frac{4T_s \cos \delta}{\rho_w g d_m} \quad (1)$$

式中: $T_s$ 为水的表面张力; $\delta$ 为水与固体的接触角; $d_m$ 为毛细管直径; $\rho_w$ 为水的密度; $g$ 为重力加速度; $h_c$ 为毛细水上升最大高度。

试验采用 MXG-1 型毛细管水上升高度仪(见图 1)。每套装置由仪器支架、3 支有机玻璃管及配套的有机玻璃盛水桶、挂绳拉簧、橡胶管、止水夹组成。有机玻璃管有效长度为 100 cm,顶端敞口可以与大气连通且配有塑料盖。玻璃管内径为 40 mm,壁厚约 3 mm;管壁每 10 cm 设有一直径为 10 mm 的小孔,孔口配有密封橡胶塞。特制挂绳拉簧可以保证盛水桶内水量减少时水面位置维持恒定。

毛细水上升高度主要试验步骤如下:

(1) 将筛分配制好的一定质量的砂样,根据预定的密度及其在玻璃管内对应的土柱高度,通过漏斗将土样分 5 次装入有机玻璃管中,每装完一层土样,用手从下往上多次拍打玻璃管侧壁,并配合捣



图 1 MXG-1 型毛细管水上升高度仪  
Fig.1 Height instrument used in capillary rise

棒不断振捣，从而使土颗粒逐渐密实；在土柱高度略大于设计高度 5 mm 时添加上一层土体，重复手拍和捣棒振捣，重复步骤直至全部土体加入。最后整体拍打振捣使土柱与设计土柱高度相等，从而保证了制样的密度和均匀性。

(2) 盛水桶挂好挂绳，接好橡胶管并夹上止水夹 根据试验内容向盛水桶装满水或其他配制溶液。

(3) 辅助水平尺，调整挂绳长度控制盛水桶水面比有机管 0 点高出约 1 cm，调整完成后固定挂绳与挂钩，在特制的挂绳拉簧作用下盛水桶内的水面高度将始终保持不变。

(4) 松开橡胶管上的止水夹，打开有机玻璃管底部的排气孔，待排气孔内有水流出时用密封橡胶塞密封。

(5) 从小孔有水流出时开始计时，一定时间内观测湿润锋的位置，记录毛细水上升高度与时间。前期毛细水上升较快，每隔半小时记录湿润锋所在位置，之后随着毛细水上升速度变慢，读数时间间隔相应加大。

### 2.2 土样与溶液配置

试验用钙质砂直接取自某岛礁，按照《土工试验规程》(SL237 - 1999) [16]，烘干后筛分成 1~2、0.5~1.0、0.25~0.50、0.10~0.25、0.075~0.100、<0.075 mm 共 6 种粒组砂样，之后再根据试验设计的粒径和密度等进行配制。试验各配制 5 组不同不

均匀系数的连续级配试样、不同粒径和不同干密度的单粒径试样，观测分析毛细水上升高度及其与这些因素的关系。

考虑海洋环境的珊瑚礁岛地下水为海水或咸水，选取足量的海水，采用美国 manta 水质传感器进行测试，测得主要参数是 pH 值为 8.05，盐度为 35.94，电导率为 53 170~55 000 μS/cm，氯离子浓度为 8 600~14 000 mg/L。基于海水测试的 pH 和盐度等参数，实验室配制不同浓度的 NaCl 溶液和海水稀释溶液。配制的 NaCl 溶液浓度分别为 0、10、20、30 g/L；稀释海水按海水所占比例分别为 0%、20%、40%、60%、80%、100%和蒸馏水配制。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 级配钙质砂毛细水上升高度

连续级配试样考虑不均匀系数  $C_u$  分别为 2、4、6、8、10，控制干密度为 1.48 g/cm<sup>3</sup>，曲率系数  $C_c = 1.5$ ，试样控制粒径  $d_{10} = 0.1$  mm。为叙述简便，将不同均匀系数的连续级配试样分别编号为 JP1~JP5，各试样配制参数和试验所得的毛细水高度统计如表 1 所示。每组试验进行了 60 d 的观测，观测记录毛细水上升高度随时间变化的关系（见表 1），绘制毛细水上升高度随时间变化曲线如图 2 所示，从中可以看出，不同不均匀系数的试样毛细水上升高度也不同，具体表现为随着不均匀系数的增加，毛细水高度先减小，而后缓慢增加， $C_u = 6$  是趋势变化分界点。由此说明毛细水上升高度受平均粒径影响，当不均匀系数小于 6 时，不均匀系数越小，平均粒径越小；但因曲率系数保持不变，此时粒径大小更趋平均，充填不会得到显著提升，孔隙也更细小发育，毛细作用就越强烈，毛细水上升速度越快、高度越高。当  $C_u$  为 6~10 时，平均粒径增加，土体颗粒分布范围更广，级配趋于良好，土体间因平均粒径增加而出现的大孔隙可得到细小颗粒充填，毛细管也可以有良好的发育；在曲率系数保持不变的情况下毛细水上升高度随  $C_u$  增大而增大。从图中还可以看出 JP1 土样上升高度明显高于其他 4 组，说

表 1 试样配制参数和毛细水高度统计表  
Table 1 Samples parameters and height of capillary rise

试样编号	$C_u$	$C_c$	$d_{50}$ / mm	$d_{60}$ / mm	该粒径所占质量百分比 / %					毛细水高度 / cm
					1~2	0.5~1.0	0.25~0.50	0.10~0.25	0.075~0.100	
JP1	2	1.5	0.393 75	0.2	11.0	10.0	14.0	55.0	10.0	54.9
JP2	4	1.5	0.546 25	0.4	16.0	17.0	37.0	20.0	10.0	47.7
JP3	6	1.5	0.661 25	0.6	22.5	25.5	27.0	15.0	10.0	44.5
JP4	8	1.5	0.770 25	0.8	31.0	28.0	18.0	13.0	10.0	45.4
JP5	10	1.5	0.858 50	1.0	40.0	24.0	14.0	12.0	10.0	47.2

注： $d_{50}$ 、 $d_{60}$  分别为平均粒径与限制粒径。

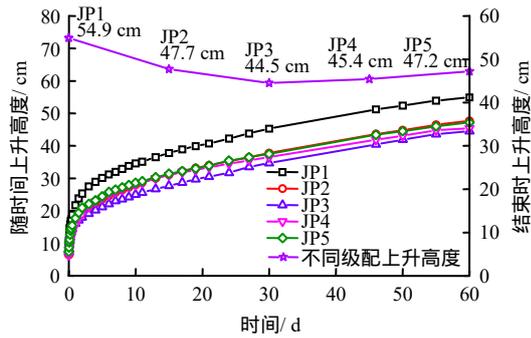


图2 连续级配钙质砂毛细水高度时间曲线  
Fig.2 Height of capillary rise with time of continuous grading calcareous sand

明细颗粒含量依旧是影响级配砂毛细水上升高度的重要因素，当细粒含量多时，即便砂土的级配差，但细小孔隙的存在使其仍有强烈的毛细作用。

3.2 单粒径钙质砂毛细水上升高度

分别选择了粒径为 1~2、0.5~1.0、0.25~0.50、0.10~0.25 和<0.1 mm 的 5 组均匀粒径钙质砂完成毛细水上升高度试验，受制样过程影响，实际干密度略有差异，分别为 1.15、1.15、1.15、1.30、1.20 g/cm<sup>3</sup>。不同粒径下毛细水高度随时间变化关系如图 3 所示。从中可以看出，粒径越大毛细水上升高度越小，上升速度趋缓的时间也越短，符合毛细水高度计算公式 (1)，毛细水高度由该粒径下的孔隙大小和接触角共同决定和影响。根本原因在于均匀且粒径单一的试样，颗粒与颗粒之间形成的孔隙均匀且缺少更细小的颗粒充填，因而孔隙越大；反之粒径越小，粒间孔隙越小，毛细作用便越强烈。另从图中还可以看出，5 组单粒径试样总体趋势虽随着粒径的增大，毛细水上升高度逐渐减小，但当粒径大于 0.25~0.50 mm 后，减小趋势微弱。

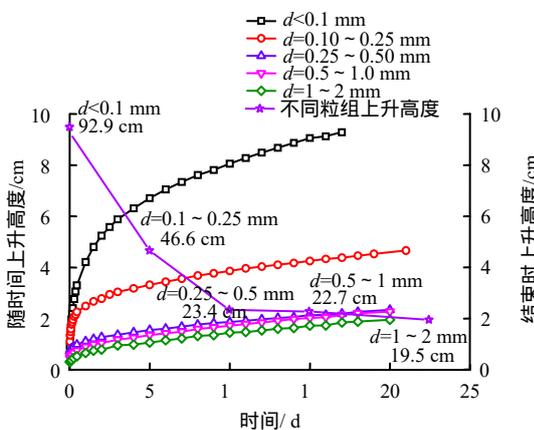


图3 单粒径钙质砂毛细水高度时间曲线  
Fig.3 Height of capillary rise with time of uniform calcareous sand

3.3 不同干密度钙质砂毛细水上升高度

为分析干密度对钙质砂毛细水高度的影响，特在单粒径钙质砂毛细水上升高度试验结果基础上，选取毛细作用较强的钙质砂颗粒，粒径为 0.075~0.250 mm 的细砂，控制干密度分别为 1.24、1.29、1.33、1.36、1.40 g/cm<sup>3</sup> 和粒径小于 0.075 mm 粉砂，控制干密度为 1.19、1.27、1.35、1.42 g/cm<sup>3</sup>，开展两种单粒径钙质砂样不同干密度下的毛细水高度对比试验，结果如图 4、5 所示。从图中可以看出，细砂级钙质砂毛细水高度随干密度的增加而增高，粉砂级毛细水上升高度却随干密度增大而减少。原因为细砂级钙质砂随着干密度增大，密实程度增大，粒间孔隙因挤密而减少，毛细现象增强；而粉砂级钙质砂试样，自然状态下本身粒间孔隙已非常细小发育，毛细作用显著，但随着干密度的增加，毛细管道受挤密阻隔、断续或封闭，水分运移路径更加蜿蜒曲折，毛细水上升过程更加复杂；根据流体力学理论，越靠近孔壁处流速越慢，干密度增加致使孔隙变小，流体越发贴近孔壁，孔壁的阻滞、孔径的阻隔以及管道的断续等综合作用使粉砂级钙质砂干密度增加，毛细水高度降低。

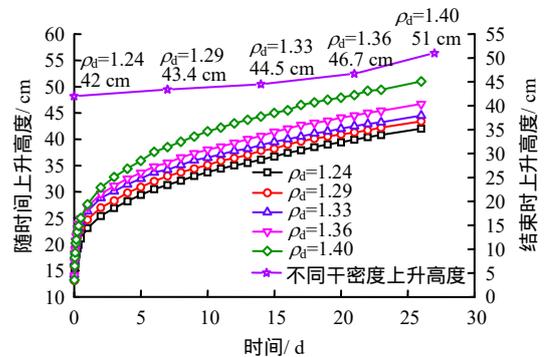


图4 不同干密度钙质细砂毛细水上升高度曲线  
Fig.4 Height of fine calcareous sand capillary rise with different dry densities

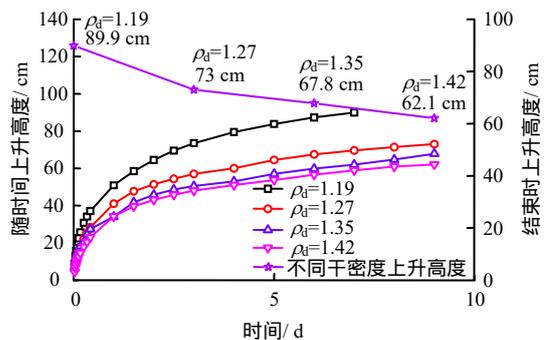


图5 不同干密度钙质粉砂毛细水上升高度曲线  
Fig.5 Height of silt calcareous sand capillary rise with different dry densities

### 3.4 不同溶液下钙质砂毛细水高度

为探究溶液对钙质砂毛细水高度的影响，设计开展了同一溶液下不同粒径钙质砂毛细水高度和不同溶液对相同粒径钙质砂毛细水高度的对比试验，分析溶液对毛细水高度的影响。试验配置不同浓度的 NaCl 溶液和稀释海水，NaCl 溶液浓度分别为 0、10、20、30 g/L，稀释海水为通过向取自某岛礁的海水中添加不同体积的蒸馏水配制而成，海水所占比例分别为 0%（纯蒸馏水）、20%、40%、60%、80%、100%（纯海水）。钙质砂试样为粒径 0.075 ~ 0.250 mm 的单粒级钙质细砂，试验时控制干密度为 1.29 g/cm<sup>3</sup>；粒径为 0.25 ~ 0.50 mm 的单粒级钙质中砂，试验时控制干密度为 1.15 g/cm<sup>3</sup>。不同浓度 NaCl 溶液在钙质细砂、钙质中砂的毛细水高度曲线见图 6、7，由图可以看出，不同浓度的 NaCl 溶液在钙质细砂和中砂中毛细水上升高度和变化规律非常相似，均呈现随着 NaCl 溶液浓度的升高，毛细水高度先减小而后增大，且均在 NaCl 浓度为 20 g/L 时毛细水高度最小，淡水条件下毛细水高度最大。

由式(1)可知，毛细水上升高度受到表面张力和溶液密度的控制，溶液表面张力越大，密度越小，则毛细水上升高度越高。而 NaCl 溶液随着浓度的增加，表面张力逐渐增大<sup>[17]</sup>，表面张力增加可以提高毛细水的上升高度，但浓度增加则溶液密度增大，毛细水高度应降低。两者正反作用的结果，使 NaCl 溶液毛细水高度未呈现单纯降低和升高。试验结果显示，当 NaCl 溶液浓度低于 20 g/L 时，毛细水高度随浓度的增加而降低，溶液密度和重力作用占优势，但当 NaCl 溶液浓度高于 20 g/L，溶液黏滞性增强，表面张力增加且占据优势地位，毛细水高度增大。

不同浓度海水溶液在钙质细砂中的毛细水高度曲线见图 8。受试验时间限制，试验未及上升过程稳定即终止了试验，25 d 里海水溶液毛细水上升高度分别为 44.1、44.1、44.7、44.4、45.1、45.3 cm，海水溶液毛细水上升高度随海水含量增加总体呈微弱增加趋势，但彼此差异甚小，数值非常接近。其原因为对于表面张力而言，同等盐度下，海水 > NaCl 溶液 > 淡水<sup>[18]</sup>，此时表面张力相比重力作用，占据优势起主导作用。

从图 6 和图 8 对比看出，不同溶液类型对钙质细砂毛细水上升高度影响较大，表现为不同浓度的 NaCl 溶液（0 ~ 30 g/L）毛细水上升高度差值为 6 cm，而不同海水含量的溶液（0 ~ 100%）毛细水上升高度差值仅为 1.2 cm。有研究表明<sup>[18]</sup>，25 时纯水的密度为 0.997 g/cm<sup>3</sup>，表面张力为 71.59 mN/m，其表

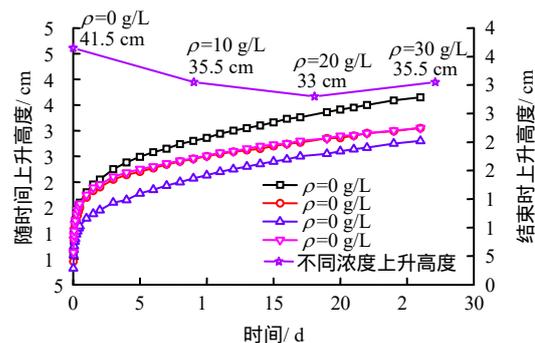


图 6 不同盐度钙质细砂毛细水上升高度曲线  
Fig.6 Height of fine calcareous sand capillary rise with different salinity solutions

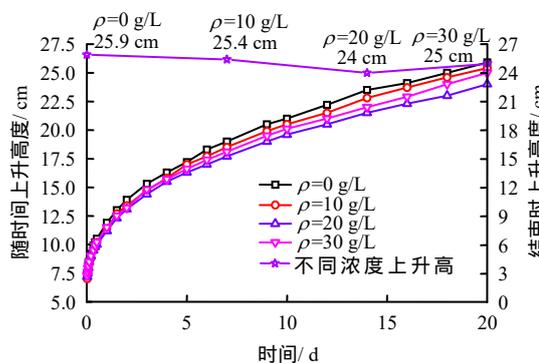


图 7 不同盐度钙质中砂毛细水上升高度曲线  
Fig.7 Height of medium calcareous sand capillary rise with different salinity solutions

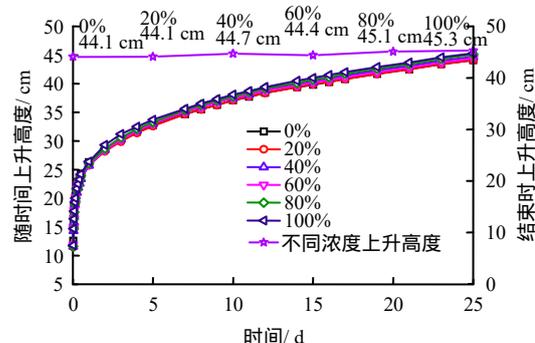


图 8 不同海水浓度钙质细砂毛细水上升高度线  
Fig.8 Height of fine calcareous sand capillary rise with various concentrations of seawater

面张力与密度的比值为 71.805；30 g/L 时 NaCl 溶液密度为 1.027 g/cm<sup>3</sup>，表面张力为 73.03 mN/m，其表面张力与密度的比值为 71.11。盐度为 3.5% 的海水溶液，其密度约为 1.032 g/cm<sup>3</sup>，表面张力为 74.21 mN/m，其表面张力与密度的比值为 71.91。淡水的表面张力与密度的比值比 30 g/L 时 NaCl 溶液略大，但比海水的表面张力与密度的比值小，说明表面张力的微小变化能引起毛细水上升高度的较大变化。另外，溶液的表面张力与浓度并非呈线性关系，表面张力

与密度的比值并非定值，因而毛细水上升高度并非简单的随溶液浓度升高而单调的增加或者减少。在钙质中砂(见图7)情况下不同溶液的 NaCl 溶液毛细水高度差值仅为 0.9 cm。说明毛细水上升高度除与表面张力和密度的比值有关外，还与毛细孔径有关。钙质中砂与细砂相比，其毛细孔径更大，孔径的影响削弱了表面张力变化对毛细水上升高度的作用。

3.5 毛细水上升高度拟合分析

毛细水上升是液体的表面张力、内聚力和附着力的共同作用的结果，往往经历最初上升快，而后逐渐趋缓的较长进程。在目前试验观测的钙质砂毛细水上升高度与时间的关系分析时发现，在双对数坐标下两者符合  $\ln h = a(\ln t)^2 + b(\ln t) + c$  的二次多项式拟合方程<sup>[1]</sup>，其参量与土体本身以及溶液相关。其中， $h$  代表毛细水上升高度 (cm)， $t$  代表毛细水从  $h = 0$  cm 处开始计时的总时间 (d)， $a$ 、 $b$ 、 $c$  为拟合参数，无量纲。在 JP1 拟合过程中，分别选取连续级配钙质砂 0~30、5~30、10~30 d 的毛细水高度数据，计算相应的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  值，之后代入拟合公式计算 60 d 时的毛细水上升高度，详见表 2 和图 9。计算结果显示，以 5~30 d 的毛细水上升高度数据来预测 60 d 的毛细水高度数据相对误差最小，0~30 d 数据计算出来的数值相对误差最大。这主要是因为前期毛细水上升速度快且不稳定，而 10~30 d 的数据相对较少。为此特将本文试验的 33 组钙质砂毛细水高度拟合方程的相关参数逐一计算，列于表 3。为研究级配、平均粒径、干密度、溶液浓度对拟合系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的影响，选取表 4 中中砂和细砂数据进行多元线性回归分析，得出以下回归方程：

当溶液为稀释海水时：

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.054 - 0.000\ 08C_u + 0.014d_{50} - 0.041\gamma_d - 0.012\rho \\ b &= 0.039 - 0.003C_u + 0.115d_{50} + 0.085\gamma_d + 0.005\rho \\ c &= 1.546 - 0.004C_u - 0.962d_{50} + 1.350\gamma_d + 0.219\rho \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $\gamma_d$  为干密度 ( $g/cm^3$ )； $\rho$  为稀释海水浓度，淡水时取值为 0，纯海水时取值为 1。

表 2 毛细水上升高度计算误差对比  
Table 2 Correlation table with the calculated and measured capillary rise

试样编号	0~30 d数据拟合计算值	相对误差 /%	5~30 d数据拟合计算值	相对误差 /%	10~30 d数据拟合计算值	相对误差 /%	60 d实测值
JP1	50.04	8.9	55.29	0.71	56.63	3.14	54.9
JP2	42.56	10.8	46.13	3.28	46.33	2.87	47.7
JP3	41.37	7.0	44.54	0.10	46.58	4.68	44.5
JP4	44.70	1.5	43.10	5.07	42.79	5.75	45.4
JP5	44.78	5.1	45.54	3.52	46.90	0.64	47.2

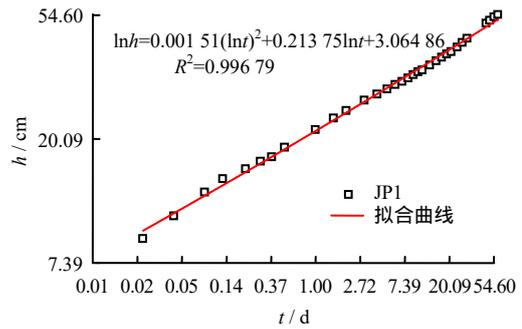


图 9 典型毛细水高度拟合曲线 (以 JP1 为例)  
Fig.9 Typical fitting curve of capillary rise (taking sample JP1 as example)

表 3 毛细水上升  $\ln t$ - $\ln h$  回归方程参数表  
Table 3 Parameters of the  $\ln t$ - $\ln h$  regression equation on capillary rise simulating

试样编号	a	b	c	相关系数 $R^2$
JP1	0.001 51	0.213 75	3.064 86	0.996 79
JP2	0.001 93	0.243 86	2.783 77	0.996 29
JP3	0.008 85	0.202 61	2.744 72	0.987 33
JP4	0.001 60	0.249 07	2.753 45	0.998 98
JP5	0.002 88	0.219 79	2.853 56	0.996 73
DY1	-0.018 33	0.327 76	3.738 59	0.999 73
DY2	-0.001 32	0.190 76	3.231 84	0.994 43
DY3	0.019 72	0.184 47	2.401 90	0.998 83
DY4	0.021 35	0.247 82	2.169 14	0.998 45
DY5	0.024 71	0.290 55	1.849 51	0.998 68
GM11	0.007 41	0.154 69	3.132 94	0.997 61
GM12	0.002 13	0.150 23	3.221 88	0.989 23
GM13	0.001 38	0.147 86	3.266 66	0.995 26
GM14	0.000 80	0.152 31	3.302 62	0.991 90
GM15	0.000 55	0.176 03	3.325 88	0.996 20
GM21	-0.028 67	0.343 77	3.945 46	0.999 85
GM22	-0.037 31	0.363 07	3.683 42	0.999 37
GM23	-0.026 76	0.335 54	3.583 84	0.998 59
GM24	-0.040 18	0.376 01	3.500 76	0.999 56
YD11	0.001 54	0.172 18	3.136 88	0.994 54
YD12	-0.005 27	0.163 53	3.080 10	0.989 85
YD13	0.003 27	0.172 59	2.881 82	0.988 21
YD14	-0.002 28	0.146 62	3.106 29	0.993 26
YD21	0.018 85	0.200 98	2.483 06	0.999 67
YD22	0.019 66	0.202 29	2.450 21	0.999 63
YD23	0.018 88	0.189 53	2.434 92	0.999 57
YD24	0.019 94	0.193 82	2.446 50	0.999 76
YD31	-0.003 71	0.157 34	3.283 29	0.992 20
YD32	-0.005 33	0.167 02	3.268 98	0.991 70
YD33	-0.004 69	0.172 08	3.264 44	0.994 52
YD34	-0.004 49	0.165 39	3.275 61	0.992 81
YD35	-0.005 15	0.169 73	3.281 05	0.992 98
YD36	-0.005 52	0.169 70	3.291 44	0.994 05

注 :JP 代表连续级配土样(见图 2);DY 代表单一粒径土样(见图 3);GM 代表控制不同干密度的土样(见图 4~5);YD 代表控制不同盐度溶液的土样(见图 6~8)。

当溶液为 NaCl 时，有

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.079 + 4.1E - 4C_u + 0.012d_{50} - 0.059\gamma_d - \\ & 3.91E - 5\rho \\ b &= 0.095 - 0.002C_u + 0.111d_{50} + 0.044\gamma_d - 1.46E - 5\rho \\ c &= 0.959 - 0.014 4C_u - 0.893d_{50} + 1.77\gamma_d - 0.005 5\rho \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

从系数的权重来看，平均粒径以及干密度所占权重较大， $C_u$  权重小。原因在于本试验的级配土样  $d_{10}$  取值相同， $C_u$  与  $d_{50}$  密切相关。本回归方程适用于粒径在 0.075 ~ 2.000 mm 的粒径较为单一的钙质砂土，NaCl 溶液盐度不超过 30 g/L。

## 4 结 论

(1) 连续级配钙质砂样细颗粒含量越多、级配越好，钙质砂毛细水上升高度越高；单一粒径钙质砂，粒径越小则毛细水上升高度越高，趋于稳定的时间也越长。当粒径超过 0.25 mm 以后，毛细水上升高度和上升速率有明显的趋同特征。随着干密度增加，细砂级钙质砂毛细水高度增加，粉砂级钙质砂中毛细水高度却减少。

(2) 随着 NaCl 溶液浓度的升高，在钙质细砂和中砂中毛细水上升高度均呈现先减小而后增大趋势，NaCl 浓度为 20 g/L 时毛细水高度最小，淡水条件下毛细水高度最大。在钙质细砂中的毛细水高度随海水含量增加总体呈微弱增加趋势，但彼此差异甚小，数值非常接近。

(3) 钙质砂毛细水上升高度与时间的关系符合  $\ln h = a(\ln t)^2 + b(\ln t) + c$ ，其参量与土体本身物性以及溶液类型相关。

## 参 考 文 献

- [1] 董斌, 张喜发, 李欣, 等. 毛细水上升高度综合试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1569 - 1574.  
DONG Bin, ZHANG Xi-fa, LI Xin, et al. Comprehensive tests on rising height of capillary water[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(10): 1569 - 1575.
- [2] 李锐, 赵文光, 陈善雄. 基于 Geo-slope 的膨胀土路基毛细水上升分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2006(增刊 1): 36 - 39.  
LI Rui, LI Wen-guang, CHEN Shan-xiong. Capillary water upward movement analysis of expansive soil roadbed based on Geo-slope[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2006, (Suppl.1): 36 - 39.
- [3] 张平, 吴昊, 殷洪建, 等. 颗粒级配对毛细水上升影响的研究[J]. 节水灌溉, 2010(7): 24 - 26.  
ZHANG Ping, WU Hao, YIN Hong-jian, et al. Effect of particle size distribution on capillary water upward movement[J]. *Water Saving Irrigation*, 2010(7): 24 - 26.
- [4] 夏宁, 黄琴龙. 长江口细砂毛细水上升高度试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2009(6): 3 - 5.  
XIA Ning, HUANG Qin-long. The experimental research of the capillarity water rising height of Changjiang fine sand[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2009(6): 3 - 5.
- [5] 栗现文, 周金龙, 赵玉杰, 等. 高矿化度对砂性土毛细水上升影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 84 - 89.  
SU Xian-wen, ZHOU Jin-long, ZHAO Yu-jie, et al. Effects of high-TDS on capillary rise of phreatic water in sand soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 84 - 89.
- [6] 苗强强, 陈正汉, 田卿燕, 等. 非饱和含黏土砂毛细水上升试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 327 - 333.  
MIAO Qiang-qiang, CHEN Zheng-han, TIAN Qing-yan, et al. Experimental study of capillary rise of unsaturated clayey sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Suppl.1): 327 - 333.
- [7] 赵明华, 刘小平, 陈安. 非饱和土路基毛细作用分析[J]. 公路交通科技, 2008(8): 26 - 30.  
ZHAO Ming-hua, LIU Xiao-ping, CHEN An. Analysis of capillary effect in unsaturated roadbed[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008(8): 26 - 30.
- [8] 米海存, 何红曼, 段吉波. 风干砂毛细水上升实验研究[J]. 节水灌溉, 2014(6): 26 - 28, 31.  
MI Hai-cun, HE Hong-man, DUAN Ji-bo. Experimental study on aeolian sand capillary rise[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(6): 26 - 28, 31.
- [9] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Physics*, 1931, 1(5): 318 - 333.
- [10] GEORGE W S. Stress from crystallization of salt[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 34(9): 1613 - 1624.
- [11] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831 - 1836.  
ZHU Chang-qi, CHEN Hai-yang, MENG Qing-shan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014,

- 35(7): 1831 - 1836.
- [12] 朱长歧, 周斌, 刘海峰. 南海海滩岩的细观结构及其基本物理力学性质研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 683 - 693.
- ZHU Chang-qi, ZHOU Bin, LIU Hai-feng. Micro-structures and fundamental engineering properties of beach calcarenite from south china sea[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(4): 683 - 693.
- [13] 任玉宾, 王胤, 杨庆. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 491 - 497.
- REN Yu-bin, WANG Yin, YANG Qing. Effects of particle size distribution and shape on permeability of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 491 - 497.
- [14] 吴野, 王胤, 杨庆. 考虑钙质砂细观颗粒形状影响的液体拖曳力系数试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3203 - 3212.
- WU Ye, WANG Yin, YANG Qing. Experiment on drag force coefficient of calcareous sand in liquid considering the effect of particle shape[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(9): 3203 - 3212.
- [15] 卢宁(美), LIKOS W J. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- LU Ning, LIKOS W J. *Unsaturated soil mechanics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [16] 中华人民共和国行业标准. SL237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Profession Standard of the People's Republic of China. SL237 - 1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.
- [17] 北京石油化工工程公司. 氯碱工业理化常数手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.
- Beijing Petrochemical Engineering Co. Ltd. Handbook of physicochemical constants in chlor alkali industry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988.
- [18] 赵鲁梅, 康小平. 海水表面张力系数与浓度、温度关系的实验研究[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2017, 17(8): 32 - 35.
- ZHAO Lu-mei, KANG Xiao-ping. Relationship between coefficient of seawater surface tension and concentration, temperature[J]. **Journal of Heilongjiang University of Technology(Comprehensive Edition)**, 2017, 17(8): 32 - 35.
- [15] 李守巨, 李德, 武力, 等. 非均质岩石单轴压缩试验破坏过程细观模拟及分形特性[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 849 - 854.
- LI Shou-ju, LI De, WU Li, et al. Meso-simulation and fractal characteristics for uniaxial compression test of inhomogeneous rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(5): 849 - 854.
- [16] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- SHI Chong, ZHANG Qiang, WANG Sheng-nian. Particle flow (PFC5.0) numerical simulation technology and application [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018.
- [17] 王传洋, 杨春和, 衡帅, 等. 压缩荷载下泥岩裂缝演化规律的 CT 试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1591 - 1597.
- WANG Chuan-yang, YANG Chun-he, HENG Shuai, et al. CT test for evolution of mudstone fractures under compressive load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1591 - 1597.
- [18] DULLIEN F A L. 多孔介质一流体渗移与孔隙结构[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- DULLIEN F A L. First-class fluid seepage and pore structure in porous media[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [19] 蒋明镜, 方威, 司马军. 模拟岩石的平行黏结模型微观参数标定[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(4): 50 - 56.
- JIANG Ming-jing, FANG Wei, SIMA Jun. Calibration of micro-parameters of parallel bonded model for rocks[J]. **Journal of Shandong University(Engineering Science)**, 2015, 45(4): 50 - 56.
- [20] 田文岭, 杨圣奇, 黄彦华. 卸围压下砂岩力学特性及细观机制颗粒流分析[J]. 岩土力学, 2016, (增刊 2): 775 - 782.
- TIAN Wen-ling, YANG Sheng-qi, HUANG Yan-hua. Particle flow analysis of mechanical behavior and meso-mechanism of sandstone under unloading confining pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.2): 775 - 782.
- [21] 张庆文, 高保彬, 马龙军, 等. 含双孔洞砂岩裂缝演化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊 2): 432 - 437.
- ZHANG Qing-wen, GAO Bao-bin, MA Long-jun, et al. Study on crack propagation in sandstone containing double circular opening[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2016, 12(Suppl.2): 432 - 437.

### 上接第 4156 页