

## NaCl 浓度对土体粒径分布和强度的影响\*

张倩<sup>1</sup> 彭昌盛<sup>1</sup> 陈广泉<sup>1</sup> 徐兴永<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100)

(<sup>2</sup> 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061)

在入海河口及海岸带地区往往由于自然或人为原因而导致海水入侵, 我国海南、广东、广西、江苏、山东、河北和辽宁等省区均有海水入侵的报道, 其中, 山东省 2002 年的海水入侵面积就达 1653km<sup>2</sup> (郭玲等, 2004; 郭占荣等, 2003; 马凤山等, 1997; 彭昌盛等, 2007)。海水入侵过程中, 地下水的水位和化学组成会发生剧烈的变化, 地下水化学性质的变化将通过地下水体与土体接触过程中所发生的一系列吸附、溶蚀、离子交换、沉淀或结晶等物理化学反应, 使土体的化学组成、空间结构和物理力学性质发生改变 (任俊等, 2005)。研究表明, 几乎所有黏土颗粒都呈微团聚体的形式存在, 不同地球化学环境和成因类型的微团聚体在水稳性方面往往有很大差异, 当水化学条件改变时 (如咸淡水环境变化), 黏土颗粒可能发生膨胀或收缩, 土中的微团聚体可能分化或凝结成更小或更大的微团聚体 (吴恒等, 1999)。黏土颗粒或微团聚体的变化改变了土体的表面性质和微观结构, 从而影响到土体的强度, 进而影响到河口海岸的侵蚀速度、沿海建筑物的地基强度等。因此, 研究海水入侵过程中水化学环境变化对土体强度的影响具有重要的理论和实际意义。本试验以莱州湾重塑土为研究对象, 研究不同 NaCl 浓度及不同含水率条件下土体剪切强度的变化, 得出其影响规律; 同时探究了 NaCl 浓度对土体粒径分布的影响, 得到粒径分布曲线, 并分析了粒径分布与强度变化的关系。

### 一、材料与方法

#### 1. 供试材料

试验用土取自莱州湾地下 20~40m 处。将所取土粒混合均匀, 其物理力学性质如表 1 所示, 按照《土工实验方法标准》(GB/T50123—1999) 进行重塑土样制备, 并按标准分层击实。

表 1 试验土样的物理力学指标

土层深度	比重	液限	塑限	塑性指数
<i>d/m</i>	<i>G<sub>s</sub></i>	<i>W<sub>L</sub>/%</i>	<i>W<sub>p</sub>/%</i>	<i>I<sub>p</sub></i>
20~40	2.76	23.2	17.1	6.1

\* 收稿日期: 2008 年 10 月。

## 2. 试验方法

(1) 直剪试验: 根据库仑定律, 土体黏聚力、抗剪强度、荷载存在以下关系式(王培清等, 2007)

$$\tau = c + pf = c + p \tan\varphi \quad (1)$$

式中,  $\tau$  为土的抗剪强度, kPa;  $c$  为土体内聚力(黏聚力), kPa;  $\varphi$  为土的内摩擦角( $^{\circ}$ );  $p$  为法向应力, kPa;  $f$  为摩擦系数。

在 4 种不同的法向荷载 ( $p=50\text{kPa}$ 、 $100\text{kPa}$ 、 $150\text{kPa}$ 、 $200\text{kPa}$ ) 作用下, 进行土样的直剪试验, 测得相应的  $\tau$  值, 求得  $c$ 、 $\varphi$  值。本试验采用应变式控制直剪仪, 在上下盒中填土料, 下盒相对于上盒移动, 垂向施加荷载, 通过百分表衡量位移, 当百分表读数最大或达到 4mm 时记数, 换算得到剪应力。

(2) 粒度试验: 采用激光粒度分析仪检测土体粒径分布。为保证取样一致, 本试验采取物理方法, 不添加化学分散剂。取烘干样 10g 置于 250ml 锥形瓶中, 加入 200ml 蒸馏水浸泡, 在恒温振荡器中震荡 24h, 使水土充分混合。根据所配悬液密度, 用移液管取 1ml 混合样加入激光粒度分析仪待测。同时, 为保证样品处于同一水化学环境, 即测定时溶液背景值与土壤浸出液成分一致, 需预先在土水比为 1:20 的情况下用 50g 土制备出 1000ml 的水提取液, 以供粒度分析时采用(吴芝兰等, 1997)。

## 3. 试验步骤

(1) 将土样烘干碾碎, 加入不同体积的水或 NaCl 溶液, 浸湿 12h, 本试验采用的 NaCl 浓度分别为 0、0.5%、2.0%、5.0%;

(2) 将土样分层击实制备环刀样, 采用固结排水的方法, 在 4 种不同的竖向荷载 ( $p=50\text{kPa}$ 、 $100\text{kPa}$ 、 $150\text{kPa}$ 、 $200\text{kPa}$ ) 下将环刀样在 ZYY-IIB 型十二联直剪预压仪上固结 4h;

(3) 固结排水后进行直剪试验, 记录量力环上的读数, 绘制  $\sigma$ - $\tau$  曲线, 得到剪切力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ ;

(4) 在激光粒度仪上先测土壤浸出液在不同盐容量条件下的背景值, 然后加入土样, 测其粒度分布, 做出曲线, 为分析强度变化的原因提供基础。

## 二、试验结果与分析

### 1. 含水率对土体强度的影响

在相同盐度(浓度为 5%)润湿条件下, 不同含水率的  $\sigma$ - $\tau$  曲线绘制如图 1 所示。

由图 1 看出, 不同含水率条件下, 土体的剪应力均与法向应力成正比。随压力的增大, 颗粒间的距离减小, 排列紧密, 内聚力增强。图 2(a) 是土体强度随含水率变化的分布点, 可以看出, 土体抗剪强度与起始含水率有明显相关关系, 含水率越大抗剪强度越小。含水率的升高使颗粒间可自由移动的重力水增多, 加大了土体界面间的润滑作用, 降低了其抗剪强度。

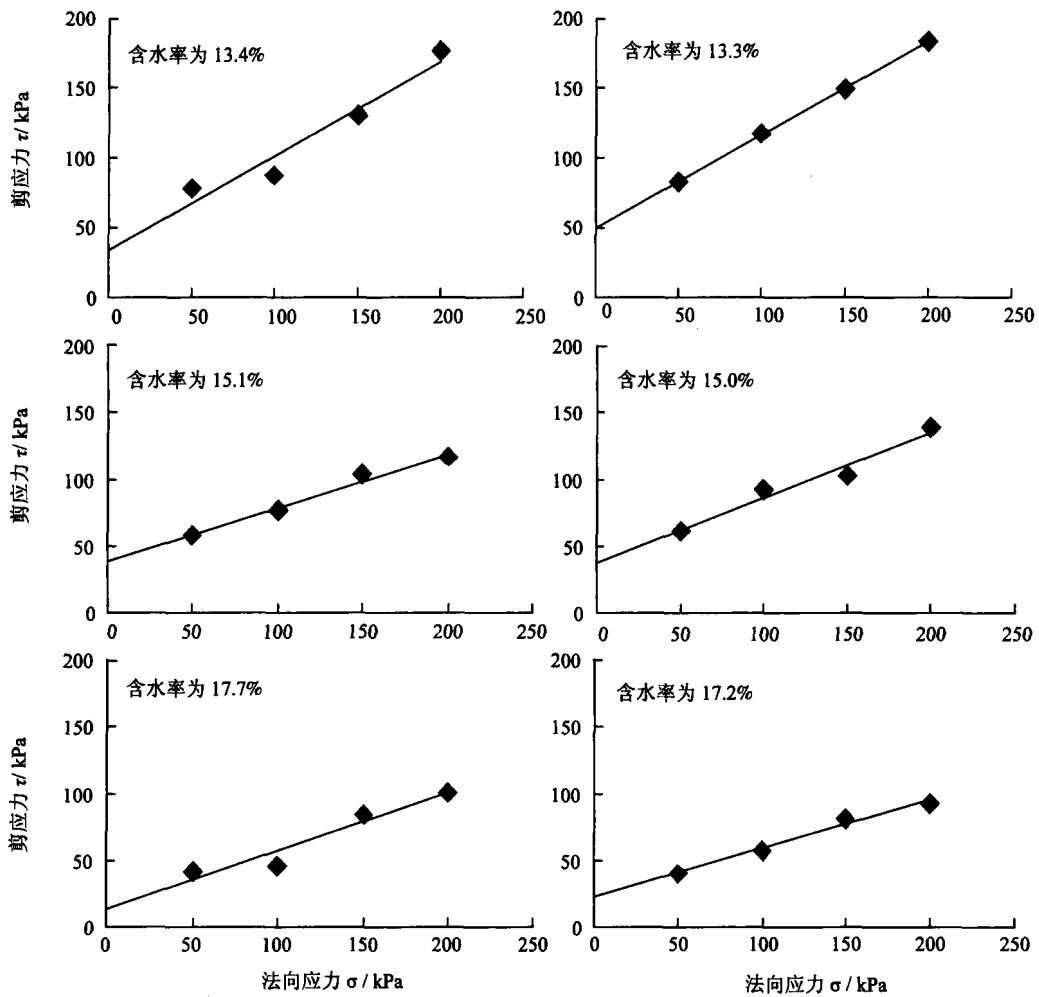


图1 不同含水率下的土体强度曲线

含水率对黏聚力的影响比对内摩擦角的影响大,从图2中两者的斜率可以看出,这是由黏性土黏聚力与内摩擦角的形成机理不同所造成的。含水率越小,土体颗粒之间摩擦较好,从而使土体有较高的抗剪强度,利于土体的稳定性。

不考虑溶液条件,颗粒之间的作用力主要有范德华力和静电力(汤连生,2000)。颗粒大小相同时,颗粒之间的距离决定了颗粒间的作用力。土颗粒表面由于水的存在形成结合水膜,使相邻土粒之间形成公共水化膜,同时还影响着颗粒间的距离。含水率较小的时候,颗粒之间形成水化膜厚度比较小,公共水膜连结力大;同时颗粒距离相对于干燥颗粒远而相对于高含水率颗粒较近,范德华引力大于静电斥力,体现为强度较大。反之,含水率大的时候,凝聚力小,抗剪强度低。

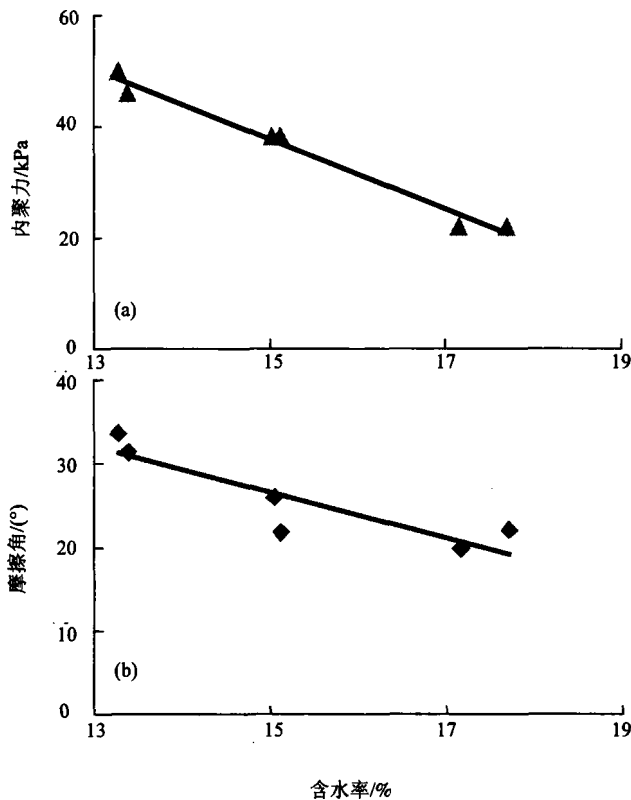


图2 含水率与内聚力(a)及内摩擦角(b)的关系

将重塑土用不同浓度的盐溶液润湿,在不同含水率的条件下进行剪切试验,将试验结果绘制成图。图3清楚地展示了不同浓度的NaCl条件下,强度随含水率变化趋势的差异。可以看出在不同NaCl浓度下,土体强度在含水率13%~18%的范围内随含水率的升高均呈现递减趋势,但是斜率不同。NaCl浓度为0.5%的时候,变化趋势最快,随盐度增加直线变缓,在5%的时候变化趋势最慢。出现这种现象的原因可以通过对土体的粒度分析来解释。如图4(b)~(d)所示,是NaCl浓度为0、0.5%、2%、5%条件下,重塑土样通过激光粒度分析仪测定的粒度分布图。水与土相互作用时,通过改变土中水溶液的离子成分及浓度、土中的黏粒含量等,改变了颗粒表面的结合水、双电层、静电力、湿吸力等(杨淑华等,2004),从而改变了水土体系的物理化学成分。

## 2. 不同含水率和盐度对土体强度的影响

从图4中可以看出,盐度对粒径的影响较大。当NaCl浓度从0到0.5%时,粒径分布的右峰明显增大,小于 $5\mu\text{m}$ 的粒径含量从67%降到43%,相应粒径为 $5\sim 50\mu\text{m}$ 的颗粒含量增加,颗粒发生聚集;当NaCl浓度从0.5%到2%时,颗粒在 $200\sim 900\mu\text{m}$ 处形成了更大的聚团,细颗粒进一步发生絮凝。这说明加入的NaCl浓度小于2%时促进了土颗粒絮凝。根据stern双电层模型,双电层分为吸附层和扩散层。在液相环境中,NaCl的加入把溶液中用来中和土颗粒表面电荷的反离子从扩散层排斥到吸附层(Mohan *et al.*, 1997),

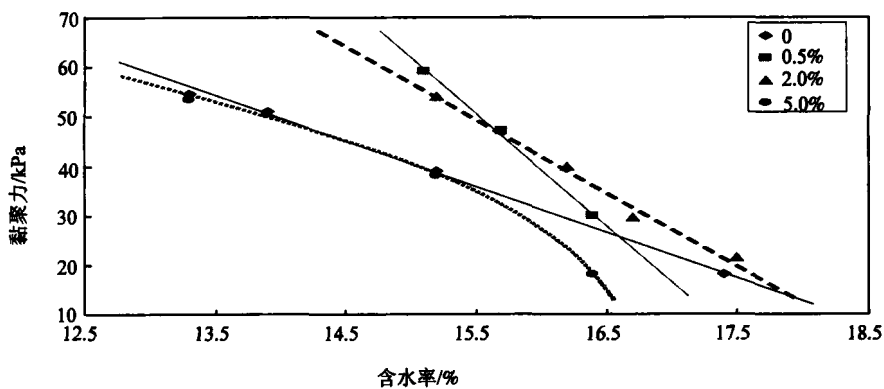


图3 不同盐度下土体强度随含水率的变化

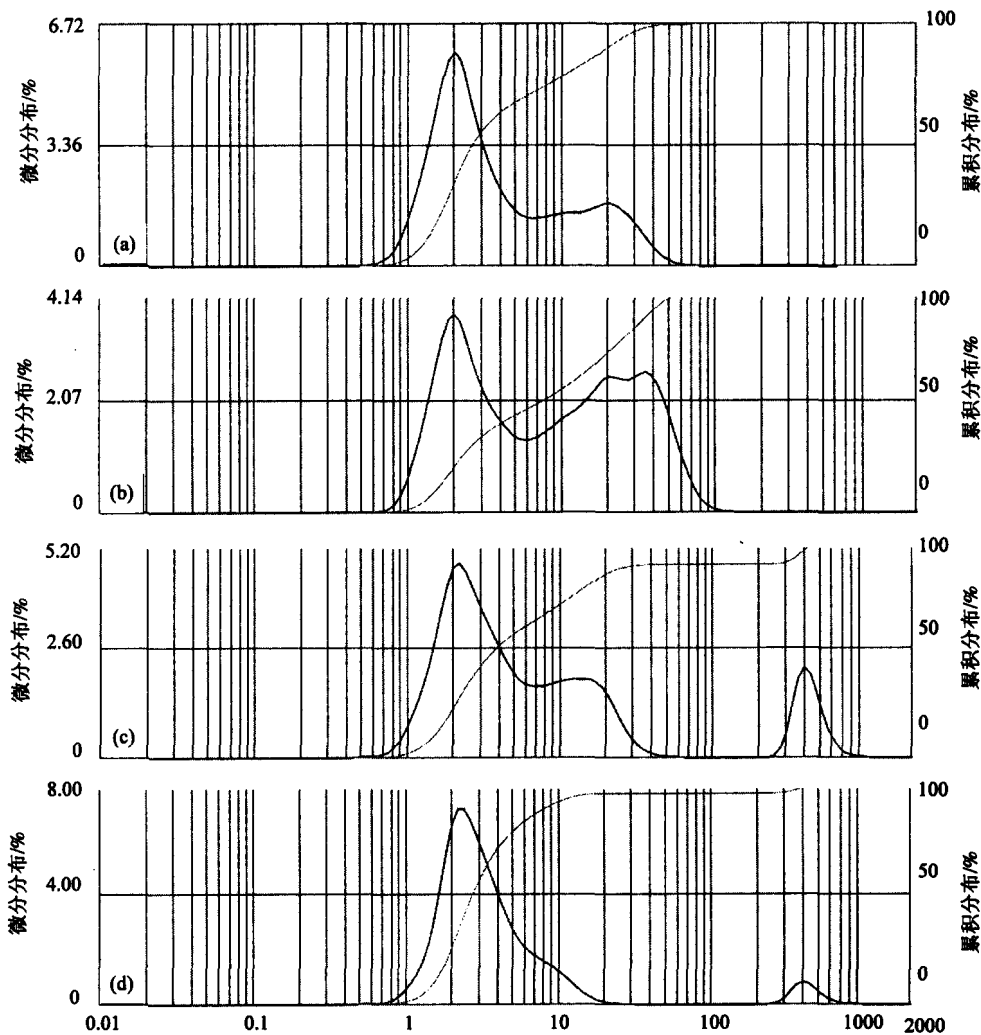


图4 不同浓度下的粒径分布曲线

(a) 0; (b) 0.5%; (c) 2%; (d) 5%

蓝线表示粒径的微分分布; 红线表示累积分布

压缩双电层, 颗粒聚集。同时, Zeta 电位减低甚至变为零, 达到等电点时, 细颗粒最易沉降。随着 NaCl 浓度进一步增加, 细颗粒容易成层分布, 凝聚现象加剧, 土体密度增大。由图 4(d) 可看出当 NaCl 浓度增加到 5% 时, 大颗粒反而减少, 200~900 $\mu\text{m}$  范围的累计量下降 5%, 且 1~5 $\mu\text{m}$  范围内的颗粒累计量比纯水条件下增加了 7%。这是由于颗粒的 Zeta 电位由零到正, 电荷反转, 絮凝性能变差。

一般来说, 土体颗粒之间通过水化膜彼此相连, 范德华力与静电力基本保持稳定。颗粒的大小和距离决定着彼此间的作用力。颗粒变大, 相同距离下范德华力变大, 比表面积变小, 相同含水率条件下水化膜的厚度变厚。随颗粒间距离的增大, 范德华力减小, 双电层发育, 体系不稳定, 导致颗粒之间连接松散, 抗剪能力减弱。若外加离子打破原有平衡, 压缩颗粒减小粒间距离, 则土样压密强度增加。

NaCl 浓度为 0.5% 时, 5~90 $\mu\text{m}$  的土体粒径最为集中。此粒径范围内, 颗粒的大小和距离适中, 含水率的变化引起颗粒表面作用力的程度相近, 微小的改变对强度影响很大, 因而强度变化趋势最明显。当大颗粒增加时, 在含水率变化相同的情况下, 水化膜厚度相对于大粒径的改变减小, 对土体强度的影响减小, 相应浓度为 2% 时的曲线较 0.5% 变缓。NaCl 浓度为 5% 时, 5~90 $\mu\text{m}$  的粒径分布区域变窄, 同时存在大颗粒。相对于 NaCl 浓度为 0 的土体, 由于小于 5 $\mu\text{m}$  的小颗粒占主导, 斥力相对于扩散双电层厚度的增加也增加, 呈共同消长趋势, 体现在强度变化上是 5% 的曲线比纯水要缓。

### 三、结 论

通过室内重塑土的试验, 在研究水化学作用对土体性质的影响, 尤其是 NaCl 对土颗粒粒度和强度的影响时, 得出以下结论。

(1) 含水率对土体抗剪强度和摩擦性能的影响较大。针对莱州湾的土体, 当含水率为 13%~18%, 随含水率升高强度减小, 且摩擦角呈减小趋势。

(2) 通过不同 NaCl 浓度下土体强度随含水率变化的试验发现, 含水率在不同盐度条件下对土体抗剪强度的影响都呈减小趋势, 但程度不同, 在 NaCl 浓度为 0.5% 时强度变化最快。

(3) 盐度对土体粒径分布的影响很大, NaCl 浓度为 0~2% 时, 对颗粒絮凝起促进作用, 而当浓度进一步增加时, 絮凝作用减弱, 颗粒分散。

(4) 综合盐度和含水率以及静电力和范德华力等各因素的作用对颗粒大小和距离的改变程度, 分析得到, 5~90 $\mu\text{m}$  的粒径决定着土颗粒的作用力大小。

(5) 不足和建议: 后续试验可考虑通过测量颗粒表面水化膜的厚度进一步对现象进行测定分析, 为定量研究土体性质作进一步努力。

### 参 考 文 献

- 郭玲, 武海顺, 金志浩. 2004. 电解质对细颗粒泥沙稳定性的影响研究, 山西师范大学学报, 18(3): 67-71  
郭占荣, 黄奕普. 2003. 海水入侵问题研究综述. 水文, 23(3): 10-15  
马凤山, 蔡祖煌, 宋维华. 1997. 海水入侵机理及其防治措施. 中国地质灾害与防治学报, 8(4): 16-22  
彭昌盛, 刘萍, 陈友媛. 2007. 我国海水入侵形势与对策. 中国科技成果, (9): 18-20

- 任俊, 沈健, 卢寿慈. 2005. 颗粒分散科学与技术. 北京: 化学工业出版社. 66-74
- 汤连生. 2000. 水-土化学作用的力学效应及机理分析. 中山大学学报, 39(4): 104-109
- 吴恒, 张信贵, 易念平等. 1999. 城市环境下的水土作用对土强度的影响. 岩土力学, 20(4): 25-30
- 王培清, 王保田, 陈西安. 2007. 不同含水率对筋土界面抗剪强度的影响. 施工技术, 36(8): 86-89
- 吴芝兰, 曲永新. 1997. 微团聚体分析在工程地质研究中的应用. 工程地质学报, 5(3): 283-288
- 杨淑华, 孔宪芳, 孙向东. 2004. 山东省海咸水入侵现状及防治措施. 山东水利, (10): 38, 39
- Mohan K K, Fogler H S. 1997. Effect of pH and layer charge on formation damage in porous media containing swelling clays. *Langmuir*, 13(10): 63-72

## Effect of NaCl Concentration on Size Distribution and Strength of Soil

ZHANG Qian<sup>1</sup> PENG Changsheng<sup>1</sup> CHEN Guangquan<sup>1</sup> XU Xingyong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Ocean University of China, Qingdao 266100)

(<sup>2</sup> The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061)

### ABSTRACT

Based on direct shear test and ultrasonic size analyzer test, shear strength and size distribution under the situation of different salinity of NaCl are studied in this paper. The experiment indicates that the shear strength changes with the variation of the salinity, and the effect is intensified by water content. It is speculated that the salinity affect the electric double layer and the thickness of water film on the surface of the particle, for the particles get together or detach from each other. The thickness of electric double layer changes, cohesion among particles changes because of the changing of the thickness of water film.