

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.03.012

吹填海砂溶陷变形试验

卢佩霞¹,徐永福²,陈志明³,金明东³

(1. 扬州工业职业技术学院建筑工程学院,江苏 扬州 225127; 2. 上海交通大学土木工程系,上海 200240;
3. 南通市公路管理处,江苏 南通 226001)

摘要:以江苏省启东吹填海砂为研究对象,采用固结仪测量吹填海砂的溶陷变形情况。测得启东吹填海砂的溶陷系数为 1.1%,低于高等级公路路基填料溶陷系数小于 1.5% 的标准要求,可以用于路基填料。对启东吹填海砂掺加 NaCl,人工配制成不同含盐量的试样,研究含盐量和压力对溶陷系数的影响,结果发现:随着含盐量增加,溶陷系数增加;压力为 200 kPa 时溶陷系数最大。
关键词:吹填海砂;盐渍土;溶陷系数;路基填料
中图分类号:TU47 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2015)03-0261-06

Experiment on subsidence deformation of dredger fill sea sand

LU Peixia¹, XU Yongfu², CHEN Zhiming³, JIN Mingdong³

(1. Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou 225127, China;
2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
3. Highway Administering Bureau of Nantong City, Nantong 226001, China)

Abstract: Subsidence deformation of dredger fill sea sand in Qidong City, Jiangsu Province, was studied using a consolidometer. Dredger fill sea sand with a subsidence coefficient of 1.1%, which is less than the subsidence coefficient of the subgrade filling material of a highway, i. e., 1.5%, can be used as the subgrade filling material. Sea sand samples with different salt contents were prepared by adding different quantities of NaCl to investigate the effect of the salt content and pressure on the subsidence coefficient. It was found that the subsidence coefficient increased with the salt content and reached the maximum value when the pressure was 200 kPa.
Key words: dredger fill sea sand; saline soil; subsidence coefficient; subgrade filling material

吹填海砂含有可溶性盐,主要为氯化钠盐。可溶性盐溶解后海砂会产生 2 种溶陷变形^[1]:(a)在静水条件下的溶陷变形,即土中的盐颗粒被溶解后孔隙增多,受外力或自重作用,导致土结构破坏,产生溶陷变形;(b)潜蚀变形,即细小盐颗粒被渗流带走形成潜蚀变形。

盐渍土的溶陷变形用溶陷系数表示。Jennings 等提出用双线法测量盐渍土的溶陷系数,即采用 2 个相同的盐渍土试样进行逐级加载压缩试验,一个不加水保持初始含水率,另一个为浸水溶液条件。根据双线法测得的溶陷系数,0~1% 时盐渍土溶陷等级为不溶陷;1%~5% 时为弱溶陷;5%~10% 时为中等溶陷;10%~20% 时为强溶陷;大于 20% 时为超强溶陷^[1]。

《公路土工试验规程》^[2]中给出单线法测量溶陷变形的方法:试样安装好后,先预加 1 kPa 的压力,使固结仪各部密切接触,安装好百分表,调整读数至零。去掉预加压力,逐级加载,加荷等级为 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa;同时开动秒表,按 10 min、20 min、30 min,以后每 1 h 读 1 次数,直到沉降稳定。在压力为 200 kPa 下沉降稳定后,自试样顶部加水至沉降稳定,继续按 50 kPa 的加压间隔加压至 400 kPa。

200 kPa 压力下浸水前后试样的高度变化量与初始高度的百分比即为溶陷系数:

$$\delta = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100\%$$

(1)

式中: δ ——溶陷系数; Δh ——浸水与不浸水试样高度之差; h_0 ——试样的初始高度。将盐渍土 $\delta < 1.5\%$ 作为高速公路和一级公路路基填料的溶陷性控制要求。

有关盐渍土溶陷特性的研究成果很多,张洪萍等^[3]认为盐渍土不同压力对应的溶陷系数存在峰值,溶陷系数和峰值溶陷压力随含水率增大而减小。宋通海^[4]指出:随着初始含水率的增大,氯盐渍土的溶陷系数减小,峰值溶陷压力和峰值溶陷系数减小;在压力增加到一定值时,溶陷系数随着含盐量的增加而增大,随着含水率的增大而减小。李永红等^[5]的试验结果表明:盐渍土的溶陷系数随着浸水压力的升高而增大,但当压力大于 200 kPa 时,溶陷系数对浸水压力的敏感性变小。程东幸等^[6]研究了粗颗粒盐渍土的溶陷特性,认为粗颗粒盐渍土的溶陷本质不仅是由于含盐量和含水率的存在,粗颗粒含量、密实性和渗透系数等都是影响地基土溶陷特性的重要因素。含盐量和竖向压力是影响吹填海砂溶陷特性的主要因素,但总体来说对吹填海砂溶陷特性的研究成果较少。本文通过室内试验测量启东吹填海砂的溶陷变形情况,评判启东吹填海砂用作路基填料的可行性;通过人工配制不同含盐量的海砂试样,探讨含盐量和竖向压力对吹填海砂溶陷变形的影响。

1 吹填海砂的基本特性

按照《公路土工试验规程》^[2]进行颗粒分析试验,启东吹填海砂的颗粒分析结果如图 1 所示,取样日期分别为 2011 年 5 月 16 日和 2012 年 4 月 22 日。从图 1 可以看出,启东吹填海砂粒径大于 0.074 mm 的颗粒质量分数不超过 50%,属于细粒土。

启东吹填海砂的液限 w_L 为 26% ~ 37%,塑限 w_p 为 17% ~ 27%,塑性指数 I_p 不超过 10。启东吹填海砂在塑性图上的分布如图 2 所示,主要落在塑性图中细砂与土的混合带上,结合图 1 将其定名为细砂质粉土。

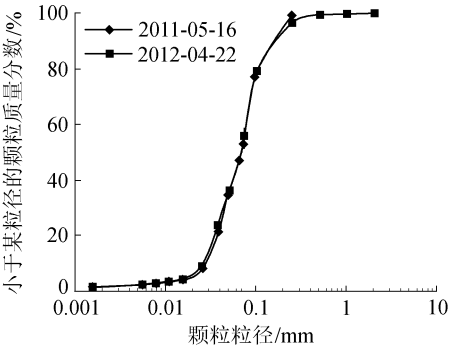


图 1 吹填海砂颗粒分布

Fig. 1 Grain-size distribution of dredger fill sea sand

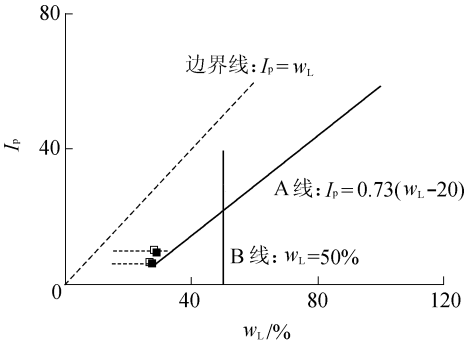


图 2 吹填海砂塑性图

Fig. 2 Plasticity chart of dredger fill sea sand

吹填海砂的易溶盐总含量测定按照《公路土工试验规程》^[2]操作,其中易溶盐总量测定采用质量法,易溶盐氯离子测定采用硝酸银滴定法,易溶盐硫酸根离子测定采用质量法。启东吹填海砂含盐成分主要是氯化物,易溶盐总量基本小于 1%;氯离子与硫酸根离子浓度之比大于 2,一般为 5 ~ 8。根据易溶盐总量、氯离子和硫酸根离子的测定结果,对照《公路路基设计规范》^[7],启东吹填海砂是典型的氯盐渍土,等级为弱盐渍土,如图 3 所示。

2 溶陷变形试验步骤

吹填海砂的溶陷试验采用固结仪完成。单线法的试验步骤如下:根据指定含水率和干密度制作试样,在设定的竖向压力下加载,1 h 内试样高度变化在 0.01 mm 内,则认为溶陷变形稳定。在压力为 200 kPa 下,待溶陷变形稳定后,维持竖向压力不变,向固结仪内注入纯净水淹没试样,要确保水足以溶解试

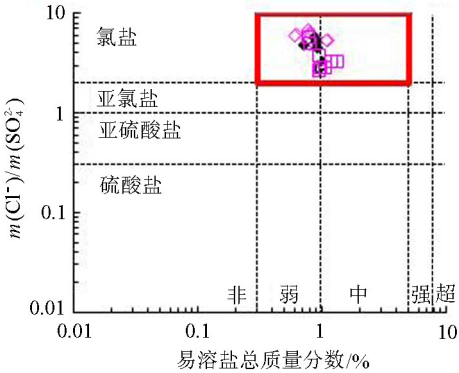


图 3 吹填海砂的盐渍土等级

Fig. 3 Saline soil grade of dredger fill sea sand

样内的可溶盐。试样在遇水后会继续压缩,直到稳定,记录注水前后试样稳定时的高度,则可计算出试样的溶陷系数。

采用双线法和单线法测量的启东吹填海砂溶陷系数比较见图 4。试样的含水率为 11.8%,干密度为 1.40 g/cm³。双线法和单线法测得的溶陷系数均为 1.1% 左右。

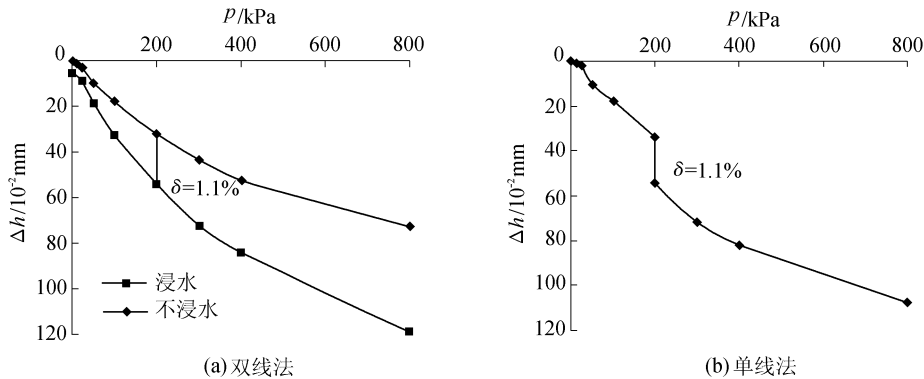


图 4 双线法和单线法测得吹填砂的溶陷系数比较

Fig. 4 Comparison between subsidence coefficients measured by different methods

吹填海砂在竖向压力 $p=200\text{ kPa}$ 作用下的溶陷变形与时间的关系曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,吹填海砂浸水后溶陷变形十分迅速,浸水 2 min 内溶陷变形完成了 56%;60 min 内溶陷变形完成了 95%。含盐量高的填土会引起路基溶陷变形,导致路基破坏^[8],所以含盐量高的路基填土需要进行改性处理,避免产生路基病害。

3 天然吹填海砂的溶陷特性

启东吹填海砂不同干密度和含水率试样的溶陷系数对比见图 6。从图 6 可以看出,启东吹填海砂的溶陷系数均小于 1.5%,可以直接用作路基填料^[9]。启东吹填海砂在固定含水率时,溶陷系数随着干密度的增加而减小,其中原因很复杂,干密度越大,孔隙率越小,在竖向压力下可压缩的空间越小,溶陷系数越小;在固定干密度时,溶陷系数随着含水率的增加而增大^[10],这是因为含水率越大,试样中的含盐量越多,盐所占空间和胶结作用越大,浸水洗盐后的溶陷变形越大,溶陷系数越大。

吹填海砂直接用作路基填料不易压实,现场通常掺加石灰和水泥进行加固处理^[11],目的是保障碾压效果和路基的稳定性。启东吹填海砂采用质量分数为 5% 的石灰和 4% 的水泥加固处理。室内控制吹填海砂干密度为 1.5 g/cm³,含水率 11.8%,固化海砂的溶陷系数随龄期变化规律如图 7 所示,海砂的溶陷系数为 0.85%。从图 7 可以看出,经过石灰和水泥固化处理后,启东吹填海砂的溶陷变形明显减小,固化海砂的溶陷性基本消除。相对而言,水泥减小溶陷变形的效果更好。根据固化海砂溶陷变形的试验结果,推荐采用水泥加固处理吹填海砂。

启东天然吹填海砂的含盐量很低,小于 1%,所以其不能反映盐渍土的溶陷变形特性。为了研究盐渍土的溶陷变形特性,揭示含盐量对溶陷变形的影响,在室

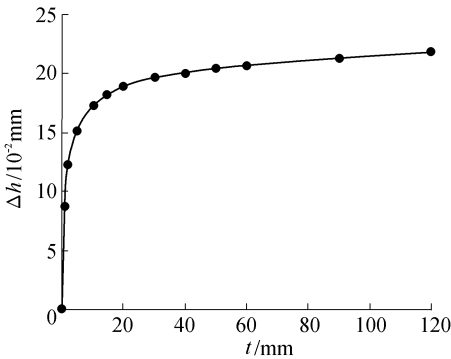


图 5 Change in subsidence deformation of dredger fill sea sand with time

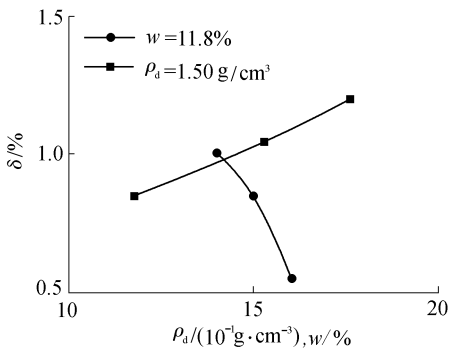


图 6 Subsidence coefficient of dredger fill sea sand in Qidong City

内人工配制中盐渍土和强盐渍土。在实验室内先对启东吹填海砂洗盐,再按照一定的含盐量人工配置盐渍土。具体步骤为:

- a. 按照比例称取一定量的 NaCl 分析纯试剂,充分溶解于蒸馏水中,制成不饱和盐溶液。
- b. 将洗盐后的海砂放置于 105℃ 烘箱内 24 h 烘干,取出后置于密封盒内冷却。
- c. 将烘干后的海砂与盐溶液按指定比例充分混合成泥浆状,含水率控制在液限附近,以利于砂样与盐分充分搅拌、混合和交换吸附。混合好的试样放置 7 d,使盐在试样中充分交换及吸附。
- d. 将试样在自然状态下风干,试样平铺在托盘内,并每间隔一段时间搅拌 1 次,以防析出的氯化钠产生表面积聚,确保盐在试样内均匀结晶与胶结。
- e. 将风干后的试样研磨,拌和均匀,再配置至指定含水率,放置于密封盒内约 7 d,让水分与土颗粒、盐充分交换吸附。

将人工配制好的含盐砂制成试样,采用单线法在固结仪上进行溶陷变形试验。人工配制含盐砂的含盐量分别为 3% 和 6%,相当于中盐渍土和强盐渍土。含盐试样的含水率为 5%,干密度为 1.3 g/cm³(孔隙比 $e \approx 1.10$)。人工配制盐渍土的溶陷变形试验结果如图 8 所示,图中用孔隙比表示溶陷过程。在浸水溶陷前,试样变形稳定时,6% 含盐量试样的孔隙比大于含盐量 3% 试样的孔隙比。原因是由于含盐量为 6% 的试样中盐结晶要多于含盐量为 3% 的试样,含盐量 6% 试样中盐起到的骨架和胶结作用大于含盐量为 3% 的盐渍土。试样浸水溶陷变形稳定后,砂中盐分充分溶解,在相同竖向压力下,含盐量越高,浸水稳定后土颗粒孔隙比越小。在浸水溶陷前,含盐量 6% 盐渍土的孔隙比大于含盐量 3% 的盐渍土;浸水溶陷稳定后,含盐量 6% 盐渍土的孔隙比却小于含盐量 3% 的盐渍土。从图 8 还可以看出,不含盐的砂的压缩性质与盐渍土不同,当竖向压力小于 200 kPa 时,含盐试样的孔隙比大于不含盐的试样;当竖向压力大于 200 kPa 时,含盐试样的孔

○ 初始状态 □ 加水前稳定状态 ■ 加水后稳定状态

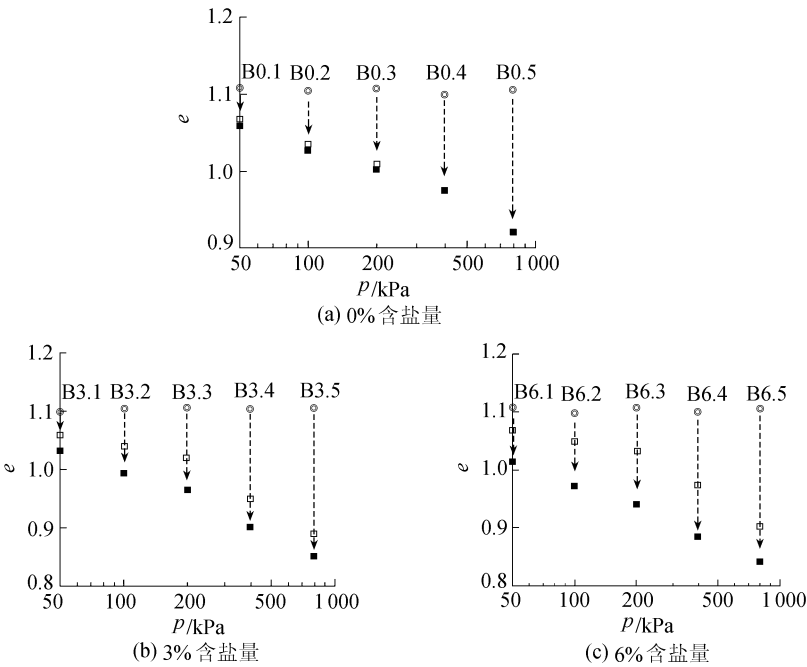


图 8 人工配制含盐海砂的溶陷过程

Fig. 8 Subsidence coefficient of prepared sea sand samples with different salt contents

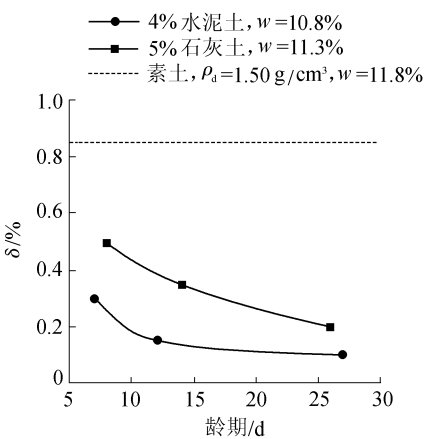


图 7 水泥和石灰固化吹填海砂的溶陷系数随龄期变化规律

Fig. 7 Change in subsidence coefficient of dredger fill sea sand reinforced by cement and lime with age time

隙比小于不含盐的试样。在高压下,结晶的固态盐被压碎,减小了试样的孔隙比。盐渍土与不含盐土的溶陷变形表现有较大的区别,不含盐的试样浸水前后孔隙比的变化很小,含盐土的孔隙比在浸水溶陷前后发生较大的变化,且含盐量越大,浸水溶陷前后的孔隙比变化越大^[12]。

含盐量不同的试样的溶陷系数随压力的变化规律见图9。从图9可以看出,在相同的竖向压力作用下,试样含盐量越高,溶陷系数越大。含盐试样的溶陷系数随着竖向压力的增大先增大、后减小,竖向压力 $p=200\text{ kPa}$ 时的溶陷系数最大。因此,盐渍土溶陷系数的定义就是指竖向压力 $p=200\text{ kPa}$ 下的溶陷变形,此时的溶陷系数最大。盐渍土的溶陷系数同时受到初始孔隙比和含盐量的制约:当盐渍土的原始结构比较密实时,即使易溶盐含量较高,在溶解淋滤后也不会发生较大的溶陷变形,即竖向压力很大时,试样致密,不容易产生溶陷变形;反之,竖向压力很小时,即使易溶盐全部溶解淋滤后,试样结构没有被压垮,溶陷变形也会很小^[13]。从图9中还可以看出,与盐渍土相比,不含盐的试样其溶陷系数非常小,且溶陷系数随着竖向压力的增大而略有减小。

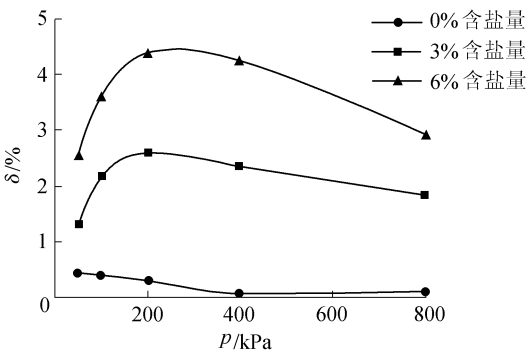


图9 人工配制含盐海砂的溶陷系数
Fig. 9 Subsidence process of prepared sea sand samples with different salt contents

4 结 论

- a. 启东天然吹填海砂的含盐量小于1%,属于弱盐渍土,溶陷系数小于1.5%,属于弱溶陷性土,可以直接用作路基填料。
- b. 水泥和石灰常用来加固吹填海砂,经过水泥和石灰加固处理后的海砂溶陷系数明显减小;水泥的加固效果比石灰的加固效果好。
- c. 人工配制盐渍土的溶陷试验结果表明,含盐量越大,溶陷系数越大;盐渍土的溶陷系数随竖向压力的增大面先增大、后减小,在200 kPa压力时溶陷系数最大。
- d. 盐渍土和普通土的溶陷变形规律不同,盐渍土的溶陷变形大,普通土的溶陷变形小,且普通土的溶陷系数随压力的增大略有减小。

参考文献:

[1] 刘永球. 盐渍土地基及处理方法研究[D]. 长沙:中南大学,2002.

[2] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].

[3] 张洪萍, 杨晓华. 盐渍土溶陷特性的试验研究与分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009,20(4):95-100. (ZHANG Hongping,YANG Xiaohua. Experimental study and analysis of saline soil's collapsibility[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2009,20(4):95-100. (in Chinese))

[4] 宋通海. 氯盐渍土溶陷特性试验研究[J]. 公路,2007(12):191-194. (SONG Tonghai. Test and research on collapsibility of chlorine saline soil[J]. Highway,2007(12):191-194. (in Chinese))

[5] 李永红,陈涛,张少宏,等. 无黏性盐渍土的溶陷性研究[C]//冯夏庭. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京:中国科学技术出版社,2002:232-234.

[6] 程东幸,刘志伟,张希宏. 粗颗粒盐渍土溶陷特性试验研究[J]. 工程勘察,2010(12):27-31. (CHENG Dongxing, LIU Zhiwei,ZHANG Xihong. Experimental study on salt resolving slump of coarse-grained salty soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2010(12):27-31. (in Chinese))

[7] JTG D30—2004 公路路基设计规范[S].

[8] 王祥,房建宏,孙继彪. 盐渍土作为路基填料时常见病害及其机理分析[J]. 青海交通科技,2005(1):28-30. (WANG Xiang, FANG Jianhong,SUN Jibiao. The common diseases and mechanism analysis of saline soil as the roadbed fillers[J]. Qinghai Traffic Technology, 2005(1):28-30. (in Chinese))

[9] 包卫星. 盐渍土公路工程分类的现状与思考[J]. 公路,2008(11):119-123. (BAO Weixing. Present situation and review for

highway engineering classification of saline soil[J]. Highway,2008(11):119-123. (in Chinese))

[10] 杨红,邵孝侯,张林,等. 天津滨海地区3种典型土壤水分物理特性[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(4):431-435. (YANG Hong,SHAO Xiaohou,ZHANG Lin,et al. Moisture-physical characteristics of three types of soils in Tianjin Binhai area [J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2011,39(4):431-435. (in Chinese))

[11] 魏学军. 沿海地区路基盐渍土填料几种实用性改良措施的探讨[J]. 交通标准化,2008(6):118-121. (WEI Xuejun. Discussion on several applied improvement measures for saline soil as roadbed filling in coastal areas [J]. Communications Standardization, 2008(6):118-121. (in Chinese))

[12] 魏进,杜秦文,冯成祥. 滨海氯盐渍土溶陷及盐胀特性[J]. 长安大学学报:自然科学版,2014(7):13-19. (WEI Jin,DU Qinwen,FENG Chengxiang. Melt sinking and salt-heaving characteristics of coast chlorine saline soil [J]. Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2014(7):13-19. (in Chinese))

[13] 徐筱在. 盐渍土地基[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1993:78-82.

· 简讯 ·

河海大学4位专家入选国务院学位委员会第七届学科评议组

国务院学位委员会第31次会议审议通过了第七届国务院学位委员会学科评议组成员名单,河海大学4位专家入选,其中工学3人,分别是:王超、高玉峰、顾冲时,理学1人:张玮。

国务院学位委员会学科评议组是国务院学位委员会领导下的专家组织,主要从事我国学位与研究生教育的咨询、研究、监督和审核工作。国务院学位委员会学科评议组成员由全国各高校推荐,由国务院学位委员会遴选产生,一般是在同行业中有较高的学术水平、有指导博士研究生的丰富经验并且在教学和科研第一线已取得显著成绩的专家学者。

(本刊编辑部供稿)